

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie électrique et de génie informatique

FABRICATION ET CARACTÉRISATION  
DE RESONATEURS GIS  
SUPRACONDUCTEURS

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie électrique

Patrice LEPAGE-LAFOND

Sherbrooke (Québec) Canada

Juillet 2019





# MEMBRES DU JURY

Serge CHARLEBOIS

---

Directeur

François BOONE

---

Codirecteur

Dominic DESLANDES

---

Évaluateur

Max HOFHEINZ

---

Rapporteur



# RÉSUMÉ

Ce mémoire rapporte les détails de la fabrication de résonateurs supraconducteurs utilisant la technologie des GIS (guides d'ondes intégrés au substrat). L'informatique quantique est un secteur de recherche en évolution. La recherche dans ce secteur se concentre actuellement à maintenir la cohérence suffisamment longtemps pour permettre de réaliser les opérations nécessaires [36]. Une des méthodes utilisées est de coupler les bits quantiques avec des résonateurs. Deux types de résonateurs sont principalement utilisés, soit les résonateurs coplanaires et les cavités 3D. La technologie des guides d'ondes intégrés au substrat devrait permettre de garder les meilleurs avantages de chacune des deux autres techniques, tout en réduisant leur plus grand défaut.

Afin de rendre les résonateurs supraconducteurs, de l'étain a été électroplaque. Les différentes étapes nécessaires sont présentées. La caractérisation électrique des couches d'étain est faite à l'aide d'une mesure quatre pointes. Cette mesure a pour but de trouver la température critique. Cette température a aussi été confirmée à l'aide d'une mesure de susceptibilité magnétique. La température de transition trouvée est de 3.8 K. Ceci correspond à la valeur de l'étain pur, ce qui indique que l'étain plaqué est de très bonne qualité.

Des résonateurs en cuivre ont d'abord été fabriqués afin de valider le procédé. La caractérisation à température ambiante des résonateurs à 10.2 GHz a permis de montrer que le facteur de qualité est de 291. Suite à ces résultats, le procédé de fabrication a été adapté pour faire des résonateurs en étain. La caractérisation de ces résonateurs est ensuite présentée. Celle-ci a permis de montrer que le facteur de qualité passe de 126 à température ambiante à plus de 2000 lorsque l'échantillon passe sous 1 K. La fréquence de résonance aussi a été caractérisée. Ce qui a permis de la voir passer de 10.14 GHz à température ambiante à 10.25 GHz à basse température. Une courte analyse explique cet effet à l'aide de la variation des facteurs géométriques.

**Mots-clés :** Résonateurs supraconducteurs, GIS, étain, microfabrication, mesures cryogéniques, ordinateurs quantiques



À ma copine Alexandra, qui m'a supportée  
tout au long du processus.



# REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait jamais pu être complété sans l'aide de plusieurs personnes. Je voudrais d'abord remercier le professeur Serge Charlebois pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur ce projet. Cela m'a permis de confirmer que le domaine de la microfabrication, auquel j'avais déjà légèrement touché en stage, est une voie qui m'intéresse comme carrière. J'aimerais aussi remercier le professeur Michel Pioro-Ladrière pour le temps que j'ai passé dans son laboratoire à faire mes caractérisations électriques à froid.

Merci au personnel des salles blanches qui m'a épaulé lors de la fabrication, soit en me formant sur les appareils nécessaires ou bien pour leur support constant, particulièrement Étienne Paradis, Marie-Josée Gour, René Labreque et Denis Pellé. Je voudrais aussi remercier les membres du groupe de recherche de Michel Pioro-Ladrière qui m'ont énormément aidé lors de la caractérisation, principalement Michael Lacerte. Merci aussi à Maxime Dion pour les mesures de susceptibilité magnétique et pour son aide avec la soudure sur étain.





# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVUE DE LA LITTÉRATURE</b>	<b>3</b>
2.1	Bits quantiques . . . . .	3
2.1.1	Fonction d'onde . . . . .	3
2.1.2	Systèmes à deux niveaux . . . . .	3
2.1.3	Relaxation et déphasage . . . . .	4
2.1.4	Facteur de qualité . . . . .	5
2.2	Circuits supraconducteurs . . . . .	11
2.3	Technologie GIS . . . . .	13
2.3.1	Résonateur GIS . . . . .	22
<b>3</b>	<b>CONCEPTION</b>	<b>25</b>
3.1	Design . . . . .	25
3.2	Choix des matériaux . . . . .	30
3.2.1	Choix du substrat . . . . .	30
3.2.2	Choix des métaux supraconducteurs . . . . .	30
<b>4</b>	<b>CADRE EXPÉRIMENTAL</b>	<b>33</b>
4.1	Fabrication des résonateurs . . . . .	33
4.1.1	Gravure ASE . . . . .	33
4.1.2	Résonateurs en cuivre . . . . .	34
4.1.3	Résonateurs en étain . . . . .	37
4.2	Montage pour mesure de résistivité . . . . .	42
4.3	Montage pour les mesures micro-ondes à température ambiante . . . . .	44
4.4	Montage pour les mesures micro-ondes à froid . . . . .	45
4.4.1	Calibration . . . . .	46
<b>5</b>	<b>CARACTÉRISATION</b>	<b>47</b>
5.1	Évaluation de la supraconductivité de l'étain . . . . .	47
5.2	Caractérisation en fréquence . . . . .	52
5.2.1	Caractérisation en fréquence à température ambiante du cuivre . . . . .	52
5.2.2	Caractérisation en fréquence à température ambiante de l'étain . . . . .	58
5.2.3	Caractérisation en fréquence du résonateur supraconducteur . . . . .	63
5.2.4	Calibration . . . . .	75
<b>6</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>77</b>
6.1	Sommaire . . . . .	77
6.2	Contributions . . . . .	78
6.3	Travaux futurs . . . . .	79
<b>A</b>	<b>PROCÉDÉS</b>	<b>81</b>

---

A.1	Procédé de fabrication des résonateurs en cuivre . . . . .	81
A.1.1	Étape préliminaire . . . . .	81
A.1.2	Lithographie . . . . .	81
A.1.3	ASE . . . . .	81
A.1.4	Greffage de la couche d'accroche . . . . .	81
A.1.5	Électroplaquage . . . . .	82
A.1.6	Dry film . . . . .	82
A.1.7	Gravure du cuivre . . . . .	83
A.1.8	Découpe . . . . .	83
A.2	Procédé de fabrication des résonateurs en étain . . . . .	83
A.2.1	Étape préliminaire . . . . .	83
A.2.2	Lithographie . . . . .	83
A.2.3	ASE . . . . .	84
A.2.4	Greffage de la couche d'accroche . . . . .	84
A.2.5	Électroplaquage . . . . .	84
A.2.6	Dry film . . . . .	84
A.2.7	Gravure de l'étain . . . . .	85
A.2.8	Découpe . . . . .	85
<b>B</b>	<b>DONNÉES</b>	<b>87</b>
B.1	Résonateur en cuivre . . . . .	87
	<b>LISTE DES RÉFÉRENCES</b>	<b>99</b>

---

# LISTE DES FIGURES

2.1	Graphique des niveaux énergétiques dans un système à deux niveaux. . . .	4
2.2	Fréquence de résonance trouvée pour un résonateur en fonction de la température [29]. . . . .	7
2.3	Schéma des résonateurs utilisés par les auteurs [29]. . . . .	8
2.4	Valeurs de Q trouvées en fonction de la largeur du conducteur central pour une température de 5 K. Les différents symboles représentent les différentes valeurs de G [29]. . . . .	9
2.5	Dépendance du facteur de qualité selon la température et la fréquence [29].	9
2.6	Effet du champ magnétique sur le facteur de qualité [29]. . . . .	10
2.7	Effet du champ magnétique sur un résonateur en niobium [4]. . . . .	10
2.8	Graphique illustrant le cheminement vers la construction d'un ordinateur quantique. [15] . . . . .	12
2.9	Modélisation tridimensionnelle d'un GIS. [14] . . . . .	14
2.10	Différentes topologies de SIW réalisables. [5] . . . . .	15
2.11	Vue du dessus d'un GIS avec schématisation des murs d'impédance. [14] . .	16
2.12	Paramètre $\kappa$ variant de 0.7 à 1.1 en fonction du diamètre des cylindres (d) et de la période(p) normalisée à la longueur d'onde de coupure. [14] . . . .	17
2.13	Paramètre $\kappa$ variant de 0.7 à 1.1 en fonction du diamètre des cylindres et de la période normalisée à la longueur d'onde de coupure. [14] . . . . .	18
2.14	Région d'intérêt d'un GIS. [14] . . . . .	19
2.15	Validation de la méthode de calcul avec le deuxième circuit. [14] . . . . .	20
2.16	Validation de la méthode de calcul avec le troisième circuit. [14] . . . . .	21
2.17	Différents filtres possibles avec les GIS. [5] . . . . .	21
2.18	Différentes transitions possibles avec les GIS. [5] . . . . .	22
3.1	Masques servant à faire la fabrication des résonateurs . . . . .	25
3.2	Vue agrandie d'un résonateur . . . . .	26
3.3	Vue conceptuelle d'un résonateur . . . . .	26
3.4	Positionnement du résonateur selon les règles de design de [14] . . . . .	28
3.5	Vue agrandie d'une ligne à transmission . . . . .	28
3.6	Vue conceptuelle d'un résonateur deux couches . . . . .	29
3.7	Vue agrandie d'un résonateur deux couches . . . . .	29
3.8	Vue agrandie d'une ligne à transmission deux couches . . . . .	29
3.9	Métaux qui peuvent être déposés de manière électrochimique, les métaux supraconducteurs sont surlignés en orange [21]. . . . .	31
3.10	Métaux qui peuvent être déposés par électroplacage, les métaux supraconducteurs sont surlignés en orange [21]. . . . .	31
4.1	Masque utilisé pour la gravure ASE, les zones jaunes sont les zones claires du masque. . . . .	33
4.2	Échantillon à sa sortie de l'ASE avant le nettoyage de la résine restante. . .	34

4.3	Vue en coupe d'un résonateur à la suite du placage. . . . .	34
4.4	Montage servant à faire le NiB. La solution à droite est celle d'activation alors que celle de gauche est celle servant à faire la déposition autocatalytique. . . . .	35
4.5	Montage servant à faire le placage de cuivre. . . . .	35
4.6	Échantillon plaqué de cuivre. . . . .	36
4.7	Masque utilisé pour la photolithographie du dry film, les zones vertes correspondent aux zones opaques du masque. . . . .	36
4.8	Observation des TSV à la caméra optique 3D. (a) TSV avec cuivre vu du dessus. (b) TSV avec cuivre vu du dessous. (c) TSV dont le cuivre a été gravé involontairement. . . . .	37
4.9	Placage d'étain dans une solution commerciale acide. (a) Placage à chaud en doublant le courant pour la première minute. (b) Placage à chaud en doublant le courant pour la première minute et en utilisant un ruban de cuivre. . . . .	38
4.10	Gravure faite dans (a) Chrome Etch (b) HF :HCl et (c)HF :H <sub>2</sub> O . . . . .	39
4.11	Effet d'ajouter de la gélatine dans la solution de placage. . . . .	39
4.12	(a) Solution maison de pH 5.7 (b) Solution commerciale de pH 1 . . . . .	40
4.13	Échantillon de silicium suite au dépôt d'or. . . . .	41
4.14	Échantillon de silicium suite au placage de l'étain. . . . .	42
4.15	Résonateurs suite à la gravure de l'étain. . . . .	42
4.16	Singularisation des résonateurs. . . . .	42
4.17	Interposeur utilisé pour faire la mesure quatre pointes. . . . .	43
4.18	Canne utilisée pour mettre l'échantillon dans le VTI. . . . .	43
4.19	Fixture utilisée pour faire les mesures fréquentielles à température ambiante. . . . .	44
4.20	Échantillon en cuivre fixé dans le porte-échantillon. . . . .	45
4.21	Échantillon en étain fixé avec de la laque d'argent. . . . .	46
5.1	Mesure de résistivité électrique à quatre pointes. . . . .	47
5.2	EDX pour des solutions de placage de (a) pH 1 et (b) pH 5.7 . . . . .	48
5.3	Diagramme de Pourbaix de l'étain. . . . .	49
5.4	Mesure de susceptibilité magnétique d'un échantillon d'étain. . . . .	50
5.5	Mesure de résistivité électrique à quatre pointes. . . . .	51
5.6	Mesure de résistivité électrique à quatre pointes. . . . .	51
5.7	(a) Caractérisation de la ligne à transmission. (b) Caractérisation du résonateur. (c) Comparaison de la transmission entre la ligne à transmission et le résonateur. . . . .	53
5.8	Grossissement de la zone d'intérêt du résonateur. . . . .	54
5.9	Mesure de transmission faite dans le boîtier vide. . . . .	54
5.10	Caractérisation à température ambiante dans le porte-échantillon (a) de la ligne à transmission (b) du résonateur en cuivre. . . . .	55
5.11	Caractérisation dans la zone d'intérêt du résonateur à température ambiante dans le porte-échantillon. . . . .	56
5.12	Comparaison des signaux transmis (a) et réfléchis (b) pour la ligne à transmission dans le boîtier et dans la fixture. . . . .	56

5.13	Caractérisation de la ligne à transmission (a) et du résonateur (b) en cuivre à température ambiante dans le porte-échantillon avec la croix. . . . .	57
5.14	Caractérisation de la ligne à transmission (a) et du résonateur (b) en étain à température ambiante dans la fixture Anritsu. . . . .	58
5.15	Grossissement des zones d'intérêts de la ligne à transmission (a) et du résonateur (b) en étain à température ambiante. . . . .	59
5.16	Caractérisation du résonateur en étain à température ambiante dans le porte-échantillon. . . . .	61
5.17	Grossissement de la zone d'intérêt du résonateur. . . . .	61
5.18	Caractérisation du résonateur selon différentes configurations du porte-échantillon. (a) Sans la croix ni le couvercle. (b) Sans la croix. (c) Comparaison entre les différentes configurations . . . . .	62
5.19	Première caractérisation à froid d'un résonateur (N168A 3). Le graphique présente la transmission en fréquence selon la température. Les courbes ont été décalées de 2dB pour la lisibilité. . . . .	63
5.20	Dépendance en température du facteur de qualité pour l'échantillon N168A 3. . . . .	64
5.21	(a) Caractérisation du résonateur N168C 2 en température. (b) Agrandissement sur la zone d'intérêt. Les courbes ont été décalées de 2dB pour la lisibilité. . . . .	65
5.22	Dépendance en température du facteur de qualité pour l'échantillon N168C 2. . . . .	66
5.23	(a) Caractérisation du résonateur N168B 1 en température. (b) Agrandissement de la zone d'intérêt du résonateur. Les courbes ont été décalées de 2dB pour la lisibilité. . . . .	67
5.24	Dépendance en température du facteur de qualité pour l'échantillon N168B 1. . . . .	68
5.25	Caractérisation à plus basse température de l'échantillon N168B 1. Les courbes ont été décalées de 2dB pour la lisibilité. . . . .	69
5.26	Dépendance en température du facteur de qualité pour l'échantillon N168B 1. . . . .	69
5.27	Caractérisation à plus basse température de l'échantillon N168C 2. Les courbes ont été décalées de 2dB pour la lisibilité. . . . .	70
5.28	Dépendance en température du facteur de qualité pour l'échantillon N168C 2. . . . .	71
5.29	Dilatation du silicium en fonction de la température. [33] . . . . .	72
5.30	Effet théorique de la fréquence de résonance en fonction de la dilatation thermique normalisée et comparaison avec les points expérimentaux. . . . .	73
5.31	Permittivité du silicium en fonction de la température [22]. . . . .	74
5.32	Effet théorique de la fréquence de résonance en fonction du changement en température de la permittivité normalisée et comparaison avec les points expérimentaux. . . . .	74
B.1	Caractérisation à température ambiante d'un résonateur (a) et d'une ligne à transmission (b) en cuivre dans la fixture. . . . .	87

B.2	Caractérisation à température ambiante d'un résonateur (a) et d'une ligne à transmission (b) en cuivre avec la croix dans la boîte. . . . .	88
B.3	Effet d'ajouter le couvercle et la croix. . . . .	89
B.4	Caractérisation du résonateur en étain N168A 1 (a) et d'un grossissement de la zone d'intérêt (b) à température ambiante. . . . .	90
B.5	Caractérisation du résonateur N168A 2 à température ambiante. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission . . . . .	91
B.6	Caractérisation du résonateur (a) en étain N168A 3 et grossissement de la zone d'intérêt (b) à température ambiante dans la fixture. . . . .	92
B.7	Caractérisation du résonateur en étain N168B 1 à température ambiante dans la fixture. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission . . . . .	93
B.8	Caractérisation du résonateur en étain N168B 2 à température ambiante dans la fixture. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission . . . . .	94
B.9	Caractérisation du résonateur en étain N168B 3 à température ambiante. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission . . . . .	95
B.10	Caractérisation du résonateur en étain N168C 1 à température ambiante. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission . . . . .	96
B.11	Caractérisation du résonateur en étain N168C 3 à température ambiante. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission . . . . .	97

# LISTE DES TABLEAUX

3.1	Température de transition des différents métaux supraconducteurs qui peuvent être plaqués classés selon leur température de transition[24]. . . . .	32
5.1	Facteur de qualité et fréquence de résonance pour les résonateurs en étain. Mesure faite à l'aide de la fixture . . . . .	60





# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

L'informatique quantique est un domaine de recherche en essor qui pourrait avoir un impact sur la vie de tous les jours. La construction d'un ordinateur quantique permettrait de faire des simulations plus complètes et complexes que ce qu'il est possible de faire même avec un superordinateur.

Un bit classique ne peut prendre que deux valeurs, soit 0 ou 1. Le bit quantique peut être dans une superposition d'états, prendre les deux valeurs à la fois. Pour cette raison, les algorithmes quantiques peuvent grandement réduire le temps de calcul nécessaire comparativement à un algorithme classique. Par contre, l'informatique quantique est confrontée à un obstacle important, le temps de cohérence des qubits. Celui-ci n'est pas suffisamment élevé pour permettre aux opérations de s'effectuer avant d'être affectées par le bruit de l'environnement. Une des solutions pour augmenter ce temps de cohérence consiste à coupler le qubit avec un résonateur. Celui-ci doit avoir le plus grand facteur de qualité possible. Deux types de résonateurs sont principalement utilisés. La première technologie utilisée est celle des résonateurs coplanaires ( $Q \sim 10^6$ ) [7]. Par contre, cette méthode possède généralement un facteur de qualité plus faible que le deuxième type, soit les cavités 3D ( $Q \sim 10^9$ ) [2]. Cette dernière technologie permet d'atteindre des facteurs de qualité très élevés. Par contre, les dimensions font en sorte qu'il est plus difficile de les intégrer dans un circuit supraconducteur.

Depuis plusieurs années, des recherches ont été faites sur les guides d'ondes intégrés au substrat (GIS). Cette technologie permettrait de fabriquer des résonateurs ayant un facteur de qualité se situant entre les résonateurs coplanaires et les cavités. De plus, les dimensions et les méthodes de fabrication permettraient de facilement les intégrer dans un circuit supraconducteur. Les recherches dans ce domaine se concentrent surtout sur les dispositifs faits de cuivre. Ce métal est utilisé puisque c'est un très bon conducteur. Par contre, la technologie des GIS n'a jamais été couplée avec la supraconductivité. C'est ce que nous vous proposons dans ce document.

Ce document se divise en cinq chapitres. Suite au chapitre 1, une revue de littérature est présentée au chapitre 2. Une introduction des bits quantiques sera faite, suivie d'une introduction aux circuits supraconducteurs. Ce chapitre se termine avec la présentation de la technologie GIS.

Le chapitre 3 aborde la conception des résonateurs. Le design utilisé est d'abord présenté, puis le choix des matériaux est expliqué.

Le chapitre 4 se consacre au cadre expérimental. C'est-à-dire la fabrication des résonateurs en cuivre et en étain. Le montage utilisé pour les mesures de résistivité à froid est présenté. Les montages pour les mesures micro-ondes à température ambiante, pour les échantillons de cuivre et d'étain, sont présentés ainsi que le montage pour les mesures des résonateurs en étain à basse température.

Finalement, le chapitre 5 introduit les résultats des différentes caractérisations. Les premiers résultats sont ceux de la mesure de résistivité à froid qui ont permis de trouver la température de transition de l'étain. Pour continuer, les résultats de la mesure de susceptibilité magnétique permettant de confirmer la température de transition seront ensuite exposés. Pour clore ce chapitre, la caractérisation fréquentielle, pour les résonateurs en cuivre et en étain, à température ambiante ainsi que la dépendance en température seront illustrées.

---

# CHAPITRE 2

## REVUE DE LA LITTÉRATURE

### 2.1 Bits quantiques

#### 2.1.1 Fonction d'onde

Les bits classiques peuvent soit être dans l'état 0, soit dans l'état 1. Le cas des qubits, bits quantiques, est différent. Ils ont la possibilité de se trouver dans une superposition de ces deux états. Ceux-ci sont représentés sous la forme d'une fonction d'onde.

$$|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (2.1)$$

avec

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (2.2)$$

$\alpha$  et  $\beta$  représentent les amplitudes de probabilités (paramètres complexes), alors que  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  représentent les états propres de même énergie de ce système. Ainsi, la fonction d'onde symétrique sera donnée par

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle \quad (2.3)$$

L'évolution d'un tel système est décrite par l'équation de Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial |\varphi\rangle}{\partial t} = H|\varphi\rangle \quad (2.4)$$

où  $\hbar$  correspond à la constante de Planck réduite et  $H$  à l'Hamiltonien de ce système.

#### 2.1.2 Systèmes à deux niveaux

Afin de permettre à un système à deux niveaux d'agir comme qubits, il faut que la différence d'énergie entre les états  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  soit différente des autres paires d'états. Cette anharmonicité est nécessaire pour exciter l'état ciblé. C'est-à-dire que  $\Delta E_{01} \neq \Delta E_{12}$  telle que présentée à la figure 2.1. Il est alors possible d'isoler  $|0\rangle$  et  $|1\rangle$  des autres transitions à l'aide de l'Hamiltonien.

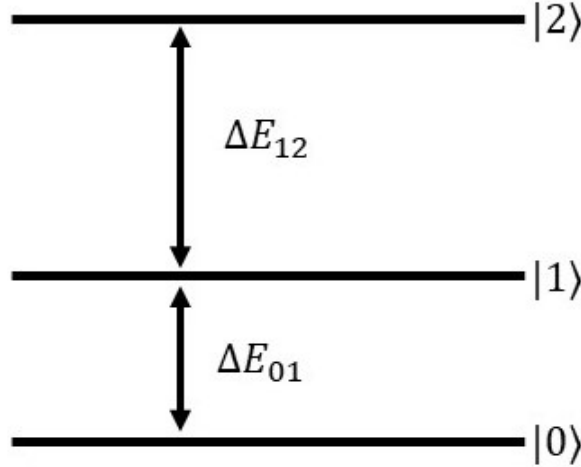


Figure 2.1 Graphique des niveaux énergétiques dans un système à deux niveaux.

### 2.1.3 Relaxation et déphasage

De manière générale,  $|0\rangle$  représente l'état fondamental alors que  $|1\rangle$  représente l'état excité du système. Puisqu'un système cherche toujours à être dans son état le plus stable, il n'est pas possible de garder l'état  $|1\rangle$  indéfiniment. Le système finira par retourner à l'état  $|0\rangle$  à cause de la dissipation d'énergie et de l'interaction avec l'environnement. Ce processus se nomme relaxation. Ce mécanisme est défini par le temps de relaxation longitudinale  $T_1$ . Cette interaction interfère aussi avec l'état du qubit. Après un certain temps, la superposition d'états est détruite, puisque l'environnement fait l'équivalent d'une mesure sur le qubit. Ce temps est défini comme le temps de cohérence  $T_2$ . Pour avoir un bon fonctionnement, il faut que

$$2T_1 \geq T_2 \quad (2.5)$$

Par contre, le temps de déphasage effectif  $T_2^*$  est plus couramment utilisé. Celui-ci correspond au temps de relaxation transversale que l'on combine avec d'autres processus. Il est donc avantageux d'avoir un temps de cohérence le plus élevé possible. L'amélioration du temps de cohérence peut se faire en couplant le qubit à un résonateur. Ceci a comme effet de découpler le qubit de son environnement. Le qubit devient alors moins sensible aux changements de son environnement. Par contre, il devient sensible au changement du résonateur. Il est toutefois plus facile de contrôler un résonateur. Bogorin et al. [3] ont fabriqué un résonateur 3D en cuivre recouvert d'étain et ont pu observer comment le qubit réagissait lors du couplage. Les auteurs concluent que le fait de plaquer le résonateur

d'étain augmente le facteur de qualité de la cavité. Ils y sont parvenus en couplant un bloc de cuivre en deux. Chacune des parties a été électropolie avec une très grande résolution. Puis le dispositif a été électroplaque à l'étain. L'épaisseur d'étain se trouve entre 2  $\mu\text{m}$  et 3  $\mu\text{m}$ . Puisque l'étain ne devait se trouver qu'à l'intérieur de la cavité, l'extérieur a été poli afin d'enlever l'excédent d'étain. Une première caractérisation à température ambiante indique que le facteur de qualité serait de 900. Ce qui est très bas par rapport au facteur attendu à basse température, mais explicable par le désordre présent dans la couche d'étain électroplaquée. Ils ont par la suite fait des mesures à froid. De la première mesure résulte un facteur de qualité de 92000 à 2.7 K. Une autre mesure cette fois à 30 mK donne un facteur de qualité de 124000. À cette température, les auteurs ont extrait les facteurs de qualité de couplage externes et internes qui sont respectivement de 950000 et 143000. Lors de leurs prises de mesures, les auteurs ont refroidi les cavités plus d'une fois et ils n'ont observé aucun changement d'état sur les cavités, ce qui laisse croire que le dispositif est résistant à un bon nombre de refroidissements et donc qu'il peut être utilisé à plusieurs reprises. Suite à la caractérisation, les auteurs couplent les cavités avec des qubits de type transmon. Pour la première cavité, ils obtiennent un temps de relaxation  $T_1$  de 33  $\mu\text{s}$  et un temps de cohérence  $T_2^*$  de 41  $\mu\text{s}$ . La deuxième cavité obtient des temps semblables avec  $T_1 = 36 \mu\text{s}$  et  $T_2^* = 42 \mu\text{s}$ . Par contre, le temps de cohérence est loin des 100  $\mu\text{s}$  atteint dans un guide d'onde tridimensionnel en aluminium [23]. En ajustant le couplage dans une cavité de cuivre, il est possible d'atteindre des valeurs semblables, même si la cavité n'est pas supraconductrice. Par exemple, un temps de cohérence de 92  $\mu\text{s}$  a été atteint par *Rigetti et al* [30].

### 2.1.4 Facteur de qualité

Les observations de *Bogorin et al.* [3] illustrent bien le fait que le facteur de qualité de la cavité couplée avec le qubit a des effets très importants sur le temps de cohérence. Le facteur de qualité correspond à la mesure du taux d'amortissement d'un oscillateur. Celui-ci est donné par [29]

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad (2.6)$$

où  $f_0$  représente la fréquence de résonance et  $\Delta f$  la bande passante à mi-hauteur ( $-3 \text{ dB}$ ). Un résonateur peut aussi être vu comme un circuit LC, ce qui donne

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

La largeur de bande à mi-hauteur est donnée par

$$\Delta f = \frac{R}{2\pi L} \quad (2.8)$$

Le facteur de qualité peut alors se réécrire comme étant

$$Q = \frac{2\pi f_0 L}{R} \quad (2.9)$$

où  $C$  est la capacité et  $L$  est l'inductance totale soit  $L_m + L_K(T)$ . L'inductance est composée de deux termes, soit l'inductance du matériel ( $L_m$ ) et l'inductance cinétique ( $L_K$ ). L'inductance cinétique correspond à l'énergie que le matériel peut emmagasiner dans le mouvement des électrons. Ce terme est donc négligeable à température ambiante, puisqu'il est proportionnel au libre parcours moyen. Lorsque l'échantillon passe sous la température de supraconductivité, l'inductance cinétique prend de l'importance. L'inductance cinétique est donnée par

$$L_K(T) = \frac{L_K(0)}{1 - (T/T_c)^4} \quad (2.10)$$

où  $L_K(0)$  est l'inductance cinétique à 0 K. En injectant 2.10 dans 2.9, on obtient,

$$Q = \frac{2\pi f_0}{R} \left( L_m + \frac{L_K(0)}{1 - (T/T_c)^4} \right) \quad (2.11)$$

Il y a dans l'équation 2.11 que trois paramètres qui peuvent varier avec la température, soit  $f_0$ ,  $R$  et  $L_K(T)$ . Pour voir comment le facteur de qualité varie en température, il faut prendre en compte l'impact de la fréquence de résonance. Selon Rahim et al. [29], la fréquence de résonance augmente lorsque la température diminue tel qu'illustré à la figure 2.2. Cette augmentation sature vers 100 K. À l'état normal, la résistance diminue avec la température. Lorsque la température chute sous la température de transition, la résistance devient nulle pour un courant DC. Par contre, pour un courant AC, ce n'est pas le cas, le supraconducteur possède une impédance de surface donnée par[25] :

$$Z_s = R_s + i\omega L_s \quad (2.12)$$

où  $R_s$  représente la résistance de surface, ce qui décrit les pertes à la fréquence angulaire  $\omega$ . Ces pertes proviennent des quelques électrons qui ne sont pas en paires de Cooper. Ceux-ci sont appelés quasi-particules. Pour une température beaucoup plus basse que la température de transition,  $R_s \ll \omega L_s$ . De plus, le terme de l'inductance cinétique devient non-négligeable, entraînant l'augmentation du facteur de qualité. Puisque les trois paramètres ont la même tendance, le facteur de qualité devrait augmenter lorsque la température diminue.

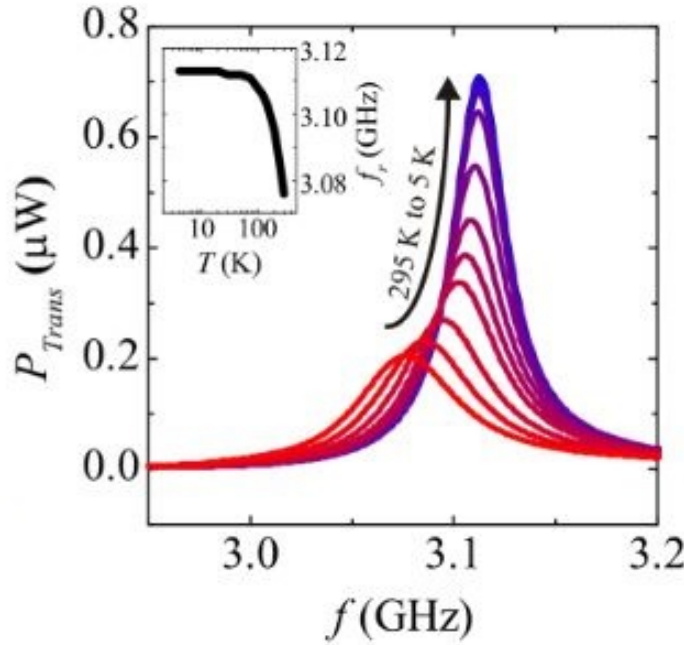


Figure 2.2 Fréquence de résonance trouvée pour un résonateur en fonction de la température [29].

Dans le même article [29], les auteurs fabriquent puis caractérisent des résonateurs coplanaires en cuivre dont le schéma est présenté à la figure 2.3. Plusieurs résonateurs ont été fabriqués, ayant tous une impédance caractéristique de  $50 \Omega$  et une fréquence de résonance entre 2.5 GHz et 20 GHz pour une température de 5 K. Tous les résonateurs ont été dessinés de manière demi-onde ouverte ( $\lambda/2$ ). Ainsi, les modes de la série harmonique se définissent pour des fréquences de résonance données par  $L = n\lambda/2$  où  $n$  est entier et  $L$  est la longueur au centre du résonateur. Les résonateurs ont été fabriqués de deux manières différentes. La première méthode consiste à pulvériser un film de cuivre, alors que la deuxième consiste à électroplaquer le cuivre. Ces deux méthodes ont été employées afin d'observer l'influence de la rugosité de surface, de la qualité des bords du centre du conducteur et la résistivité résiduelle. Dans tous les cas, le substrat de base utilisé est le

saphir. Pour tester l'influence de la largeur du conducteur central ( $W$ ), les auteurs ont fait des résonateurs ayant une largeur variant de  $20\text{ }\mu\text{m}$  à  $100\text{ }\mu\text{m}$  en faisant des variations de  $20\text{ }\mu\text{m}$ . Les résonateurs de  $20\text{ }\mu\text{m}$  à  $60\text{ }\mu\text{m}$  se trouvent sur la même pièce de saphir, alors que ceux de  $80\text{ }\mu\text{m}$  et  $100\text{ }\mu\text{m}$  se trouvent sur une deuxième pièce. De plus, ils observent aussi l'influence de la largeur du couplage capacitif ( $G$ ). Pour chaque largeur de conducteur central, cinq résonateurs ont été fabriqués avec différentes largeurs de fente de couplage soit  $10$ ,  $20$ ,  $30$ ,  $40$  et  $50\text{ }\mu\text{m}$ . Pour une température de  $5\text{ K}$ , les valeurs du facteur de qualité se trouvent à la figure 2.4. Pour ce qui est de l'influence de la rugosité de surface, la pulvérisation offre une meilleure uniformité qui pourrait aller jusqu'à faire augmenter le facteur de qualité de  $10\%$ . Le facteur de qualité le plus élevé est donc de  $470$  pour une largeur de  $100\text{ }\mu\text{m}$ . Toutefois, il était de  $120$  à température ambiante. Ces résultats sont présentés à la figure 2.5.

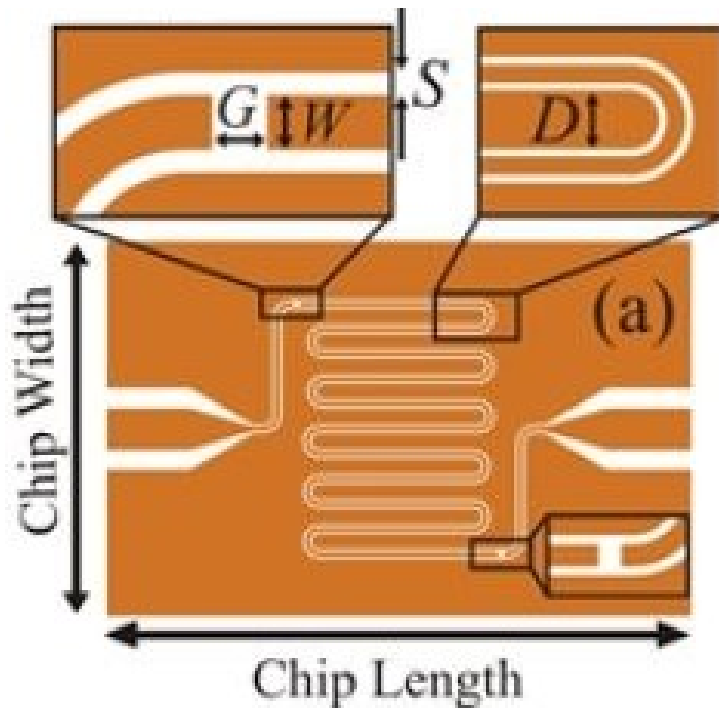


Figure 2.3 Schéma des résonateurs utilisés par les auteurs [29].



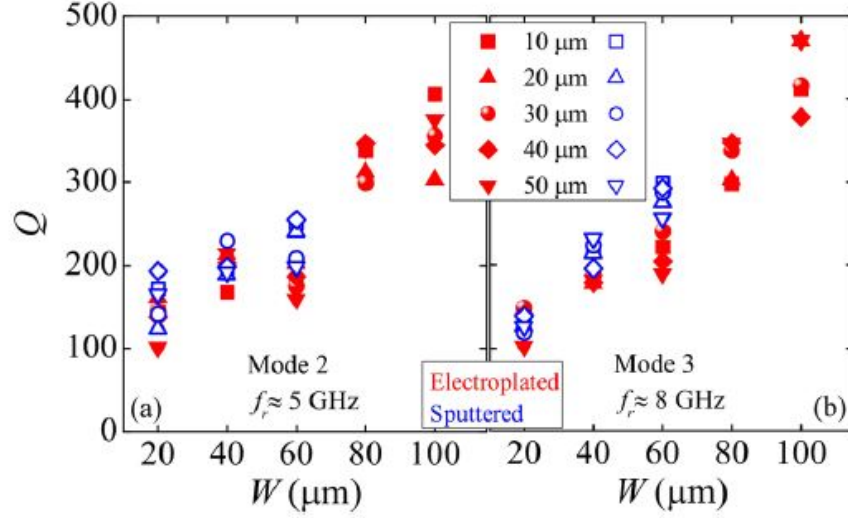


Figure 2.4 Valeurs de  $Q$  trouvées en fonction de la largeur du conducteur central pour une température de 5 K. Les différents symboles représentent les différentes valeurs de  $G$  [29].

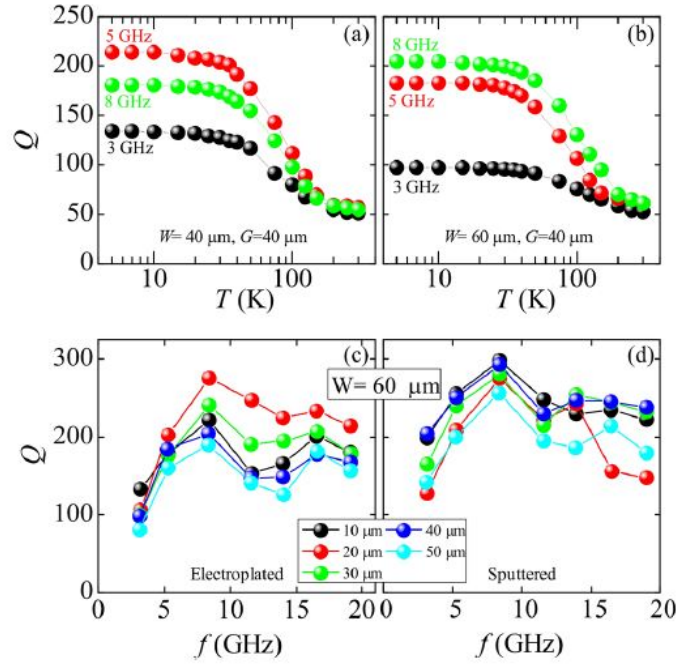


Figure 2.5 Dépendance du facteur de qualité selon la température et la fréquence [29].

Ensuite, les auteurs se sont penchés sur l'influence du champ magnétique. Tel que le montre la figure 2.6, le facteur de qualité n'est réduit que de 3.5% pour un champ de 7 T. Ce résultat est intéressant puisqu'un résonateur supraconducteur conventionnel subit

une baisse radicale de son facteur de qualité pour un champ magnétique de l'ordre du tesla, voir moins. La figure 2.7 montre l'impact qu'un champ magnétique peut avoir sur un résonateur coplanaire en niobium. Le champ critique est de l'ordre de 5 mT

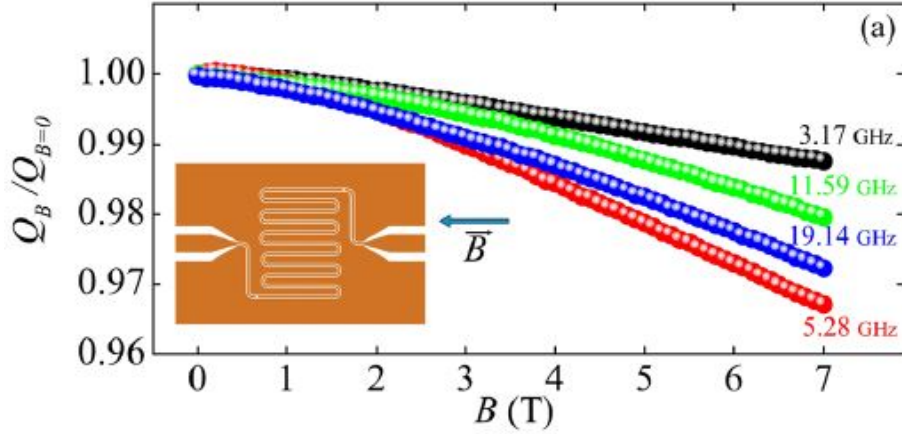


Figure 2.6 Effet du champ magnétique sur le facteur de qualité [29].

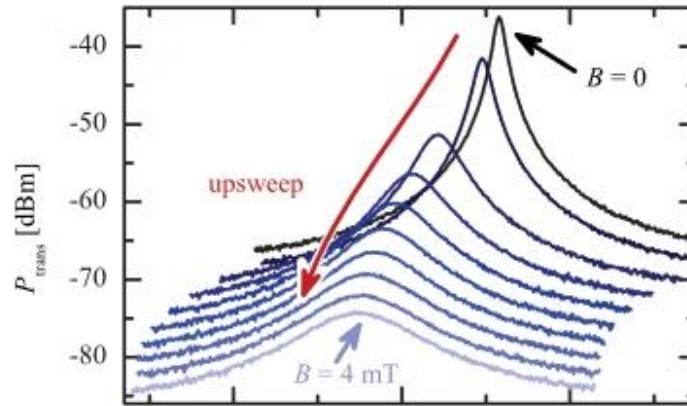


Figure 2.7 Effet du champ magnétique sur un résonateur en niobium [4].

Dans la plupart des cas, les résonateurs coplanaires ont un facteur de qualité plus bas que les cavités. Par contre, *Megrant et al.*[26] ont réussi à fabriquer un résonateur planaire ayant un facteur de qualité très élevé. Ils réussissent à atteindre un facteur de qualité aussi grand en déposant de l'aluminium très lisse tout en contrôlant la propreté à l'interface entre l'aluminium des résonateurs et le substrat de saphir.

Tel que mentionné dans la section précédente, le facteur limitant le plus important pour l'utilisation d'un qubit est son temps de cohérence. Coupler un qubit avec un résonateur

apporte plusieurs avantages. Le premier étant que le qubit est découplé de son environnement, ce qui le rend moins sensible à ce dernier, entraînant du même coup l'augmentation de son temps de cohérence. Plus le facteur de qualité du résonateur est élevé, plus le temps de cohérence augmentera. Par contre, ceci diminue la fréquence à laquelle il peut y avoir des interactions avec le qubit. Il est aussi possible de se servir de cavités comme d'une mémoire [28]. Il serait ainsi possible d'utiliser les qubits comme mémoire dans un système complexe composé de plusieurs qubits adressés individuellement.

## 2.2 Circuits supraconducteurs

Dans une revue critique du domaine [15], Devoret et Schoelkopf font une synthèse de l'informatique quantique. Ils commencent par mentionner que les circuits à base de supraconducteurs ont grandement bénéficié de la robustesse de la supraconductivité ainsi que de l'effet Josephson, mais plusieurs problèmes restent à résoudre avant d'arriver à construire un ordinateur quantique. Par exemple, maîtriser la correction d'erreur quantique et opérer des systèmes complexes de nature dissipative afin de les rendre cohérents indéfiniment. Selon les auteurs, le concept d'ordinateur quantique existe depuis les années 1990, bien que ce n'est que depuis l'invention de la correction d'erreur quantique qu'il y a de l'espoir pour construire un ordinateur quantique fonctionnel. De plus, les avancées technologiques des dernières années permettent de croire qu'il serait possible de construire un ordinateur quantique dans un futur relativement proche. Toutefois, avant de se rendre là, il y a plusieurs étapes importantes à passer (présentées à la figure 2.8) puisqu'un ordinateur quantique est composé de plusieurs étages de composantes interconnectées. Premièrement, il faut qu'un système quantique soit suffisamment bien contrôlé pour être en mesure d'écrire, de manipuler et de lire un bit d'information quantique. Deuxièmement, il faut être en mesure d'exécuter de petits algorithmes quantiques. Pour ce faire, ces deux premières étapes doivent respecter les cinq critères de DiVincenzo [16]. Les cinq critères de DiVincenzo sont :

1. Il faut être en mesure de partitionner l'espace d'Hilbert en  $n$  systèmes à deux niveaux.
  2. Il faut être en mesure d'initialiser l'état du système dans un niveau connu. Exemple  $|00...0\rangle$
  3. Il faut être en mesure d'appliquer un ensemble universel de portes logiques
  4. L'interaction entre les qubits et l'environnement doit être suffisamment faible pour être en mesure de maintenir la cohérence tout au long du calcul
  5. Il doit être possible de faire une mesure projective sur chacun des qubits et la valeur du bit classique doit correspondre avec une grande efficacité
-

Troisièmement, il faut être en mesure de faire de la correction d'erreur quantique. Cette correction demande de faire une lecture non destructive. Quatrièmement, il faudrait construire une mémoire quantique dont le temps de cohérence est plus grand que celui de n'importe quelles autres composantes du système. Ces deux dernières étapes demandent d'être capable de faire toutes les opérations à un qubit sur un seul qubit logique. Cinquièmement, il faudra faire des opérations sur un seul qubit logique. Sixièmement, des algorithmes devront pouvoir être appliqués sur plusieurs qubits logiques. Finalement, la correction d'erreur devra être appliquée sur ces qubits logiques afin d'obtenir un calcul quantique tolérant aux erreurs.

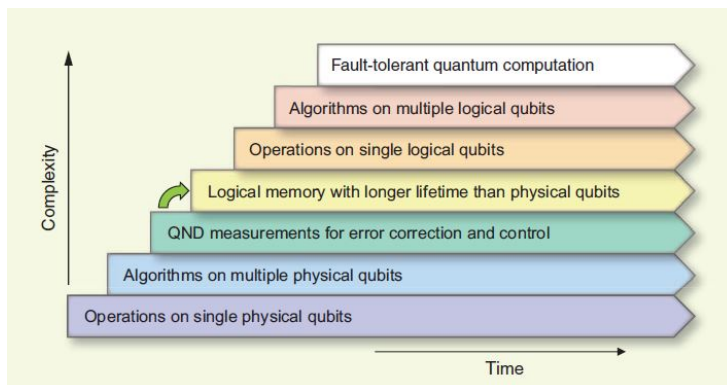


Figure 2.8 Graphique illustrant le cheminement vers la construction d'un ordinateur quantique. [15]

Ensuite, les auteurs font un tour d'horizon des circuits supraconducteurs. Ils mentionnent que l'opération des circuits supraconducteurs est basée sur deux phénomènes robustes, le premier étant la supraconductivité et le deuxième étant l'effet Josephson. Ce deuxième effet induit dans le circuit une non-linéarité qui n'introduit pas de dissipation ou de déphasage. Ceci peut être fait à l'aide d'une jonction Josephson. La transition entre l'état fondamental et l'état excité est alors bien contrôlée et le circuit peut être utilisé comme un qubit.

Trois types de qubits ont été développés soit : de charge, de flux et de phase. Plus récemment, de nouveaux types de qubits sont apparus comme le quantrionium, le transmon, le fluxionium et le qubit hybride. Ces qubits sont tous construits à partir des mêmes éléments, mais ils visent à augmenter leur puissance en réduisant leur sensibilité à la décohérence. L'évolution constante de ces designs est un signe de leur robustesse et de leur potentiel. Ces qubits sont des oscillateurs non linéaires qui agissent comme des atomes artificiels lorsqu'ils sont couplés à un vrai oscillateur, pour de faibles excitations. L'Hamiltonien permet d'étudier l'évolution du système composé de plusieurs qubits et plusieurs cavités. Typiquement, une opération à un qubit se fait en 5 à 50 ns ( $\alpha/2\pi \approx 200$  MHz) alors qu'une

opération à deux qubits intriqués prend 50 à 500 ns ( $\chi/2\pi \approx 20$  MHz). Un bon design de circuit avec qubit, qui permet de minimiser la dissipation du diélectrique près du métal du qubit et de minimiser les radiations de l'énergie dans les autres modes électromagnétiques ou dans l'environnement, a mené vers une transition de qubit ayant un facteur de qualité excédant 1 million. Ce qui correspond à un temps de cohérence de l'ordre de 100 ns, ce qui permet de réaliser des centaines, voire des milliers d'opérations. De grandes améliorations ont aussi été faites dans les lignes de transmissions résonantes et dans les autres types de qubits comme les qubits de phase et de flux. La limitation est maintenant atteinte dans les pertes inductives ou capacitives intrinsèques.

Finalement, selon les auteurs, les expériences du moment ont surtout pour but de maintenir la cohérence suffisamment longtemps pour être capables d'intriquer deux qubits ensemble. Un ordinateur quantique est essentiellement composé de plusieurs oscillateurs ayant un très grand facteur de qualité et une phase stable. Ces oscillateurs devront interagir entre eux seulement de la manière programmée. Si le problème de stabilité est résolu, les interactions non voulues avec l'environnement ou d'autres qubits causeront toujours un problème. Il faudra donc connaître et contrôler un Hamiltonien pour plusieurs qubits. Comme le nombre de mesures nécessaire pour caractériser un système de qubits intriqués augmente exponentiellement avec le nombre de qubits, cela suggère que les grands processeurs quantiques seront peut-être composés de petits modules opérant individuellement. Un second problème dans le contrôle de l'Hamiltonien est qu'il faudra combiner des qubits ayant un long temps de vie avec des qubits qui permettent des lectures rapides. Pour ce faire, il faut avoir des modes avec des facteurs de qualité beaucoup plus faible ( $\sim 100$  pour des canaux de mesure en 50 ns). Ces qubits devront coexister avec les qubits ayant un temps de vie beaucoup plus long ( $Q \approx 10^6 - 10^9$ ). Ces derniers demandent d'être parfaitement isolés des composantes à haute fréquence du circuit. Si seulement 0.01% de l'énergie d'un de ces qubits tombe dans un mode de bas facteur de qualité, le temps de vie de ce qubit est complètement détruit. Même si ce niveau d'isolation est probablement faisable, aucune solution n'a pour le moment été proposée. Pour conclure, la fabrication d'un ordinateur quantique ne deviendra pas un problème purement technique, la compréhension de la physique devra avancer au même rythme que la conception.

## 2.3 Technologie GIS

Un GIS est un guide d'onde intégré au substrat, traduit de Substrat Integrated Waveguide (SIW). C'est un guide d'onde composé de deux rangées de vias insérés dans un diélectrique tel que présenté à la figure 2.9. Les vias doivent être composé d'un matériau conducteur. De

plus, il n'est pas nécessaire de remplir les vias, ce qui important est d'avoir une épaisseur suffisante pour bien conduire et réduire les pertes. De plus, ceux-ci agissent comme un guide d'onde rectangulaire conventionnel pour la propagation. Ils conservent aussi les avantages des guides rectangulaires, tels que le grand facteur de qualité. Il est donc possible de les intégrer dans des technologies planaires telles que les PCB. Le plus grand avantage des GIS est de rendre possible l'intégration de toutes les composantes sur le même substrat. Il est possible d'inclure des composantes passives, des éléments actifs et même des antennes.

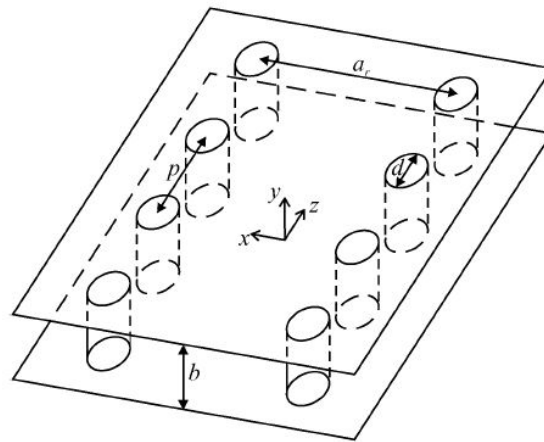


Figure 2.9 Modélisation tridimensionnelle d'un GIS. [14]

Tel que mentionné, les ondes dans un GIS ont une propagation semblable à celle des guides d'onde rectangulaires à condition d'avoir certaines caractéristiques. Il faut que les vias soient assez près les uns des autres et que les pertes radiatives soient négligeables. La propagation dans les GIS se fait selon le mode  $TE_{mn}$ . Par contre, les modes  $TM$  ne sont pas supportés à cause des espaces entre les vias.

À la figure 2.10, différentes topologies de SIW possibles sont présentées.

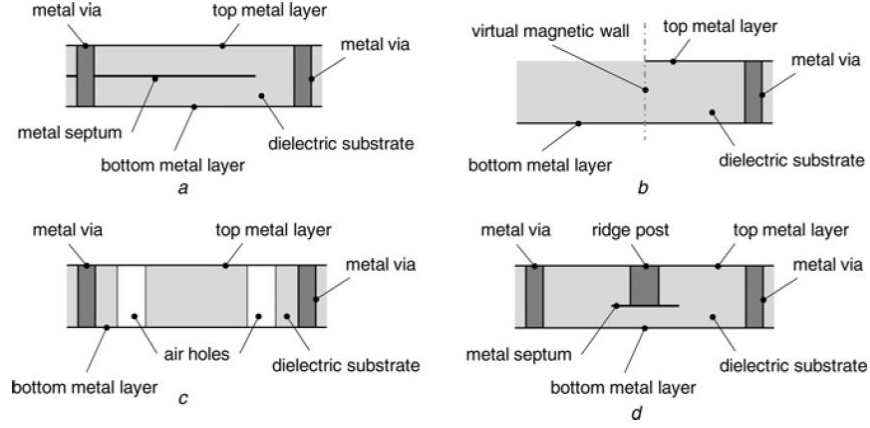


Figure 2.10 Différentes topologies de SIW réalisables. [5]

a Guide d'onde plié intégré au substrat b GIS demi-mode  
c Guide d'onde en plaque intégrée au substrat d GIS à crête

À la figure 2.10.a se trouve un SIW replié sur lui-même séparé par une cloison métallique. Ce modèle a comme avantage de diviser les dimensions par deux ou plus en augmentant que très peu les pertes. Un autre type de SIW peut être fait pour diminuer de moitié les dimensions (2.10.b). Ce type se base sur le fait qu'un mur magnétique virtuel apparaît à l'endroit de la coupure verticale. Dans le but d'augmenter la bande passante, deux autres types de SIW ont été pensés. Celui présenté à la figure 2.10.c permet d'augmenter la bande passante de 40% entre 7.5 et 18 GHz. Finalement, le modèle présenté à la figure 2.10.d permet d'augmenter la bande passante de 73% entre 6.8 et 25 GHz.

Deslandes[14] explique les trois types de méthodes les plus utilisés pour calculer les constantes de propagation et d'atténuation ainsi que les fuites dans les dispositifs GIS. La première méthode consiste à résoudre l'équation transcendante générée à partir de la méthode des moments [19]. La deuxième consiste à modéliser les valeurs propres [8], alors que la troisième consiste à se baser sur l'impédance de surface des cylindres métalliques composants les murs des dispositifs [6, 39]. La plus grande faiblesse de ces méthodes est qu'elles requièrent la sommation des champs électriques générés par les cylindres métalliques. Il est donc très long avant d'atteindre la convergence de ces méthodes. Un problème majeur qui survient alors est qu'il faut connaître la constante d'atténuation avec une grande précision. Les auteurs proposent donc une nouvelle technique simple et rapide afin de calculer avec précision la constante de propagation dans un GIS qui possède des pertes. Pour comprendre la méthode proposée, il faut d'abord savoir qu'un champ électromagnétique dans un mode  $TE_{10}$  peut être représenté par une superposition de deux ondes planes. L'angle

entre ces deux ondes est donné par  $\theta$ . À la fréquence de coupure, cet angle est de  $90^\circ$ . Ainsi, pour un guide d'onde sans perte, les parties réelles et imaginaires de la constante de propagation sont nulles à la fréquence de coupure. Par contre, pour un guide d'onde possédant des pertes, la constante de propagation n'est jamais nulle. La fréquence de coupure est définie comme la fréquence à laquelle les parties réelle et imaginaire de la constante de propagation sont égales. Pour faire les calculs, il est possible de représenter les rangées de cylindres comme une impédance effective. Celle-ci peut être calculée à l'aide du coefficient de réflexion. Grâce à cette impédance normalisée, il est possible de trouver l'impédance de surface normalisée. Cette relation est donnée par

$$z_L = \frac{z_S + j \tan(k_c \Delta a)}{1 + j z_S \tan(k_c \Delta a)} \quad (2.13)$$

où  $z_L$  est l'impédance effective,  $z_S$  l'impédance de surface,  $k_c = 2\pi f_c \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}$  et  $\Delta a$  est la distance entre  $T_1$  et  $T_2$  sur la figure 2.11. À l'aide de cette formule, il est possible de bien caractériser un guide d'onde à la fréquence de coupure pour une impédance de surface nulle.

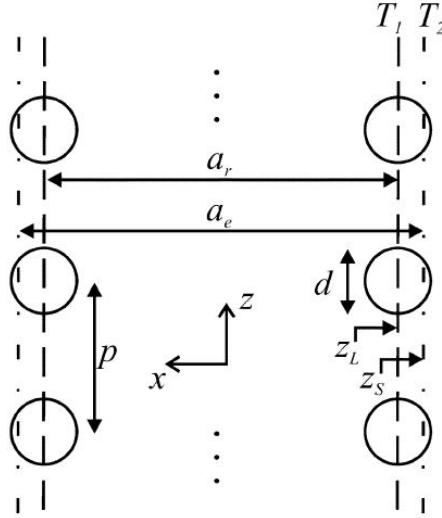


Figure 2.11 Vue du dessus d'un GIS avec schématisation des murs d'impédance. [14]

La largeur du guide d'onde n'est pas la largeur vue par l'onde. La relation pour trouver la largeur effective est [38]

$$w_{eff} = w - 1.08 \frac{d^2}{s} + 0.1 \frac{d^2}{w} \quad (2.14)$$



où  $w$  est l'espacement entre les deux rangées de vias,  $s$  est la distance entre deux vias de la même rangée et  $d$  est le diamètre des vias.

Les auteurs exposent les caractéristiques fondamentales des GIS. Pour commencer, la largeur équivalente d'un GIS est en fonction de la période ainsi que du diamètre des cylindres. En normalisant ces paramètres avec la longueur d'onde à la fréquence de coupure, il est possible d'en extraire un paramètre utile pour le design. Le ratio entre la largeur équivalente du guide et la distance réelle entre les rangées de cylindres est défini comme  $\kappa$ .

$$\kappa = \frac{a_e}{a_r} \quad (2.15)$$

À la figure 2.12, différentes valeurs de  $\kappa$  sont présentées en fonction de la période ( $p$ ) et du diamètre des cylindres ( $d$ ). La zone sous la ligne pointillée est inaccessible puisqu'elle correspond à une période plus petite que le diamètre des cylindres, ceux-ci seraient superposés.

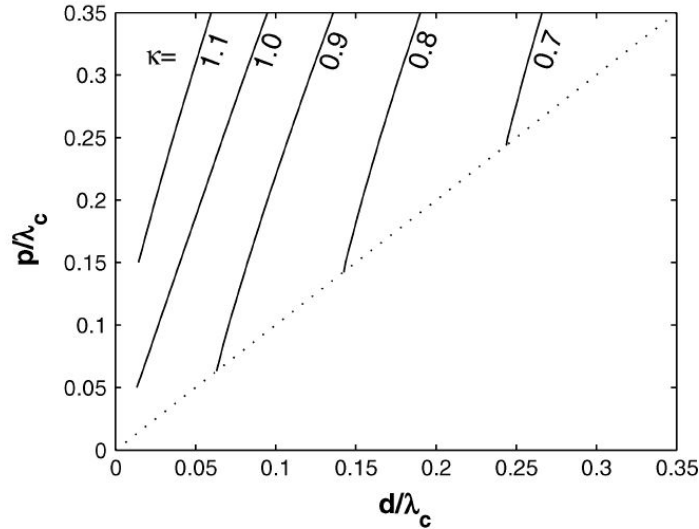


Figure 2.12 Paramètre  $\kappa$  variant de 0.7 à 1.1 en fonction du diamètre des cylindres ( $d$ ) et de la période( $p$ ) normalisée à la longueur d'onde de coupure. [14]

Quand la période augmente, le champ électromagnétique ne peut plus être confiné entre les deux rangées de cylindres. Une partie de l'énergie est donc perdue en se propageant à l'extérieur du guide. En calculant, les pertes de diélectriques et de conducteurs à l'aide de

l'équation conventionnelle pour une guide d'onde rectangulaire, il est possible de trouver le point où les pertes deviennent néfastes. Les résultats sont présentés à la figure 2.13. La région gauche permet de faire des antennes à condition que les fuites soient plus grandes que les pertes du diélectrique et du conducteur. La région droite possède peu de fuites. Les pertes viennent principalement des pertes du diélectrique et du conducteur. Finalement, la région du centre est interdite, pour des applications typiques, parce que les pertes sont trop faibles pour en faire une antenne, mais trop fortes pour faire une composante passive.

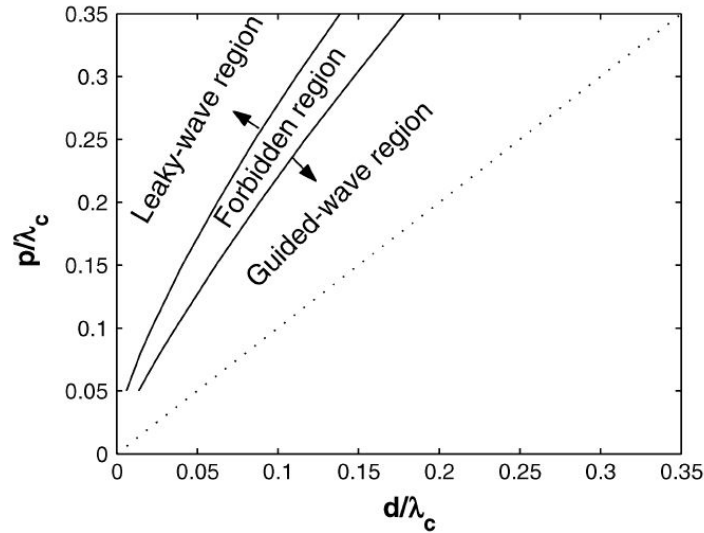


Figure 2.13 Paramètre  $\kappa$  variant de 0.7 à 1.1 en fonction du diamètre des cylindres et de la période normalisée à la longueur d'onde de coupure. [14]

Les structures périodiques peuvent créer des bandes interdites d'énergie. Celles-ci apparaissent quand

$$\beta_z p = n\pi \quad (2.16)$$

Le premier effet est donc visible quand  $n = 1$  et donc

$$\beta_z = \frac{2\pi\sqrt{3}}{\lambda_c} \quad (2.17)$$

En insérant 2.17 dans 2.16, on obtient

$$\frac{p}{\lambda_c} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sim 0.29 \quad (2.18)$$

Cette équation est présentée afin d'avoir un bandgap centré à  $2f_c$ . Dans le plan,  $d/\lambda_c$ ,  $p/\lambda_c$ , il existe une région où les GIS sont équivalents à un guide d'onde rectangulaire

conventionnel. C'est-à-dire une région où les pertes par fuite sont négligeables et qu'il n'y a pas de « bandgap » dans la zone d'opération. Cette zone est représentée à la figure 2.14.

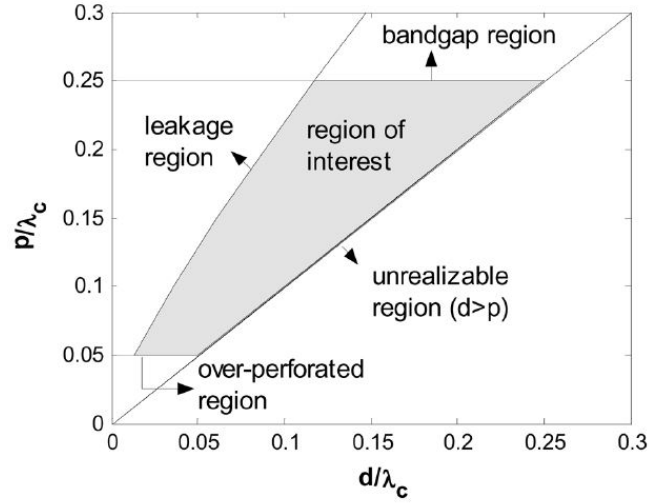


Figure 2.14 Région d'intérêt d'un GIS. [14]

Cette région est définie par quatre conditions

$$p > d \quad (2.19a)$$

$$\frac{p}{\lambda_c} < 0.25 \quad (2.19b)$$

$$\frac{\alpha_l}{k_0} < 1 \times 10^{-4} \quad (2.19c)$$

$$\frac{p}{\lambda_c} > 0.05 \quad (2.19d)$$

La condition 2.19a indique que la distance entre les cylindres doit être plus grande que le diamètre des cylindres afin d'être physiquement possible. La condition 2.19b sert à éviter d'avoir un « bandgap » dans la bande d'opération. Pour que les pertes par fuite soient considérées négligeables, la condition 2.19c doit être respectée, où  $\alpha_l$  correspond aux pertes par fuite. Finalement, la condition 2.19d n'est pas essentielle, mais est utile pour faciliter la fabrication. Si la distance entre les cylindres est trop petite, la rigidité mécanique est affectée.

Finalement, afin de bien valider la méthode, les auteurs ont fabriqué trois circuits. Le premier circuit est un guide d'onde avec peu de perte par fuite. Ils ont commencé par mesurer la constante de propagation. Pour se faire, ils ont fait les mesures sur deux circuits

de longueurs différentes et arrivent à la conclusion que leur méthode est très sensible aux variations et donc que la mesure de constante de propagation très basse est pratiquement impossible puisqu'une petite variation dans la mesure occasionnera un grand changement sur la constante de propagation. Ils ont tout de même été capables d'extraire la constante de propagation pour la bande passante d'opération. Pour mesurer la constante de propagation de manière plus précise, les auteurs ont utilisé un deuxième circuit. Ce dernier était semblable au premier, mais il comportait de grandes pertes par fuite. Les résultats sont présentés à la figure 2.15.

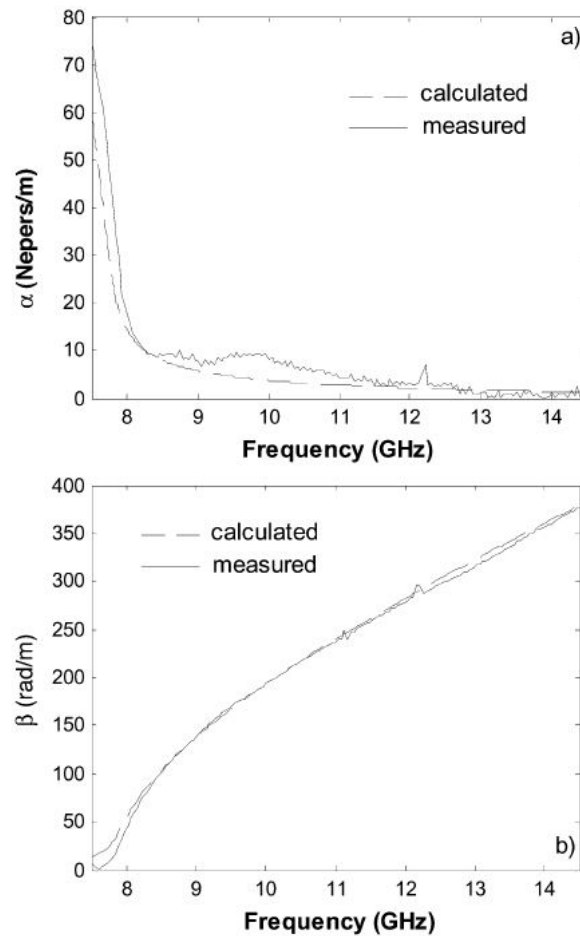


Figure 2.15 Validation de la méthode de calcul avec le deuxième circuit. [14]

Le troisième circuit qu'ils ont fabriqué sert à mesurer les pertes diélectriques et conductrices. Cette mesure sert à justifier l'utilisation des équations standards pour les pertes dans un guide d'onde. Tel qu'il est possible de le voir à la figure 2.16, les résultats sont très sensibles, la courbe de la constante d'atténuation possède beaucoup de bruit. Par contre, les valeurs trouvées sont en moyennes bonnes.

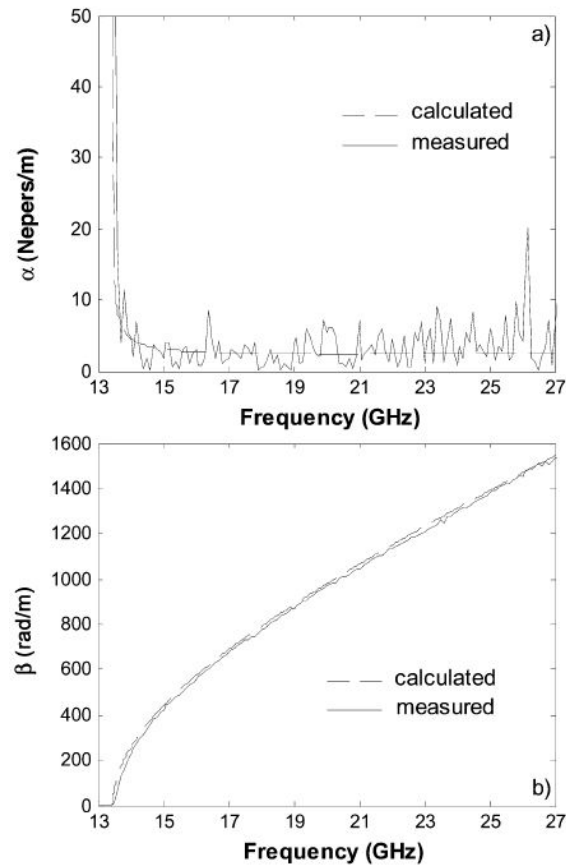


Figure 2.16 Validation de la méthode de calcul avec le troisième circuit. [14]

À l'aide de la technologie GIS, différents types de filtres ont été proposés (figure 2.17), puis fabriqués [11, 13] ou développés [9, 34].

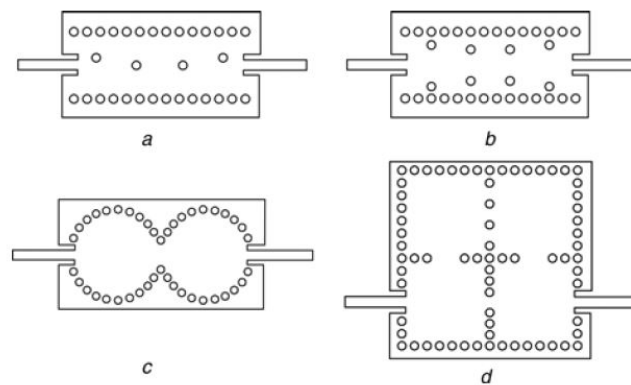


Figure 2.17 Différents filtres possibles avec les GIS. [5]

- a Filtre avec cylindres inductifs
- b Filtre avec diaphragme
- c Filtre avec des cavités circulaires
- d Filtres avec cavités rectangulaires et couplages croisés

Afin d'utiliser les GIS, il faut transmettre le signal vers les autres composantes du circuit. Les transitions entre types de guides sont donc particulièrement importantes. Pour ce faire, plusieurs designs ont été proposés (figure 2.18) afin de faire la transition entre les dispositifs microrubans ou coplanaire vers les GIS.

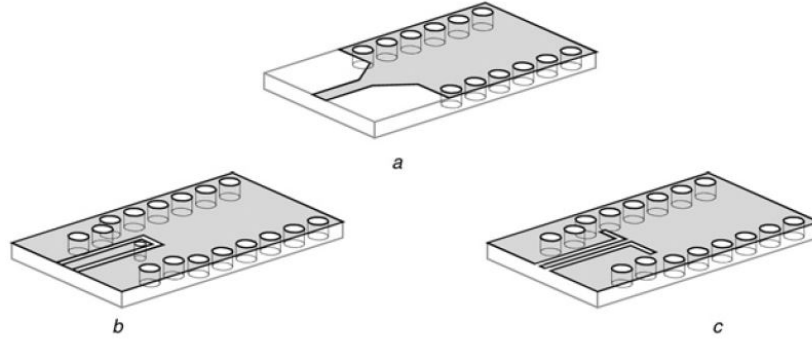


Figure 2.18 Différentes transitions possibles avec les GIS. [5]

- a Transition microruban à GIS fait par rétrécissement
- b Transition coplanaire à GIS fait par antenne de courant
- c Transition coplanaire à GIS fait par une courbe à 90° »

### 2.3.1 Résonateur GIS

La méthode la plus courante pour simuler un résonateur GIS consiste à trouver la largeur équivalente et de considérer un conducteur parfait[12]. Ce qui implique que l'inductance et la résistance ne changent pas avec la température. Dans ce modèle, c'est plutôt les facteurs géométriques qui sont responsables des variations en température. Deux contributions sont possibles dans le silicium, soit la dilatation thermique et le changement de la permittivité électrique. Ces deux effets seront approfondis à la section 5.2.3.

La fréquence de résonance pour une cavité est donnée par

$$f_{mnp} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \quad (2.20)$$

où  $a$ ,  $b$  et  $c$  représentent les dimensions de la cavité.

Selon l'équation 2.11, le facteur de qualité est donné par :

$$Q = \frac{2\pi f_0}{R} \left( L_m + \frac{L_K(0)}{1 + (T/T_c)^4} \right)$$

Puisque dans la littérature les simulations sont faites en prenant un conducteur parfait, ce sont les facteurs géométriques qui ont de l'importance. Il est possible de réécrire l'équation de la fréquence de résonance pour prendre en compte ces facteurs (équation 2.20). Dans le cas de ce travail, c'est la dilatation thermique et le changement de la permittivité électrique qui auront un impact sur la fréquence de résonance. Cette discussion sera plus approfondie lors de l'analyse des résultats à la section 5.2.3.

Puisque la technologie SIW profite des avantages des résonateurs coplanaires et des cavités tout en minimisant leurs défauts, il est attendu que le facteur de qualité se trouve entre les deux. En effet, puisque la résonance se fait comme dans une cavité, il est attendu que le facteur de qualité soit plus grand que pour un résonateur coplanaire. Par contre, le diélectrique n'est pas idéal, apportant davantage de perte, ce qui explique aussi pourquoi il est moins performant qu'une vraie cavité résonante. Dans le cas de ce projet, le fait d'avoir un métal supraconducteur devrait permettre d'augmenter le facteur de qualité puisqu'il a comme effet de diminuer la résistance et d'augmenter l'inductance cinétique.





# CHAPITRE 3

## CONCEPTION

### 3.1 Design

Le design des résonateurs et des lignes à transmission présenté dans cette section a été fait par Maxime Daigle en 2013. Le design est fait de manière à fabriquer trois résonateurs avec des largeurs de diaphragmes différentes ainsi qu'un résonateur à deux couches sur une tranche de 75 mm. Chaque résonateur est aussi accompagné d'une ligne à transmission. Les différentes structures sont présentées à la figure 3.1. La topologie des résonateurs est de type GIS demi-mode (figure 2.10). Ce sont des filtres avec diaphragmes (figure 2.17) et les transitions sont de types microruban (figure 2.18).

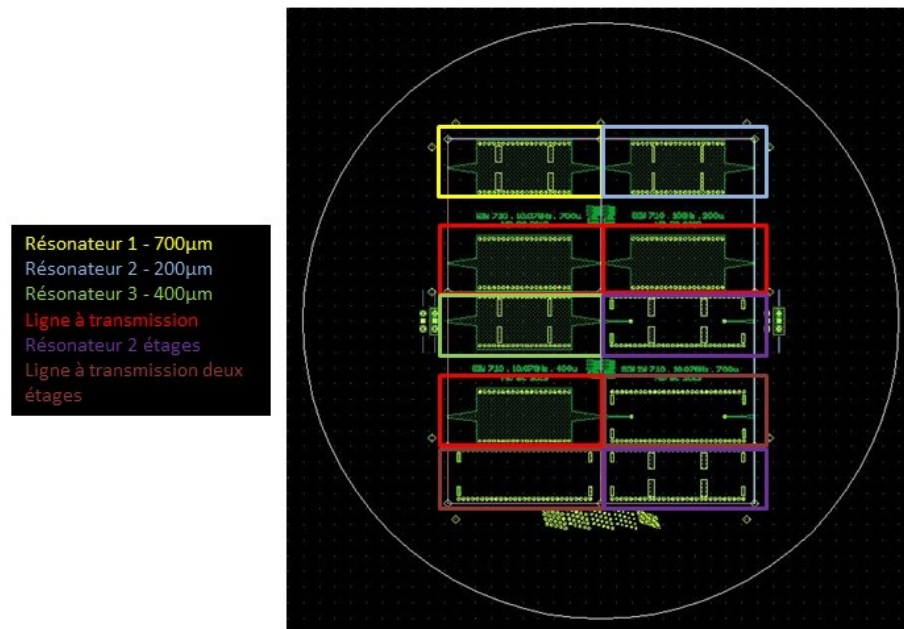


Figure 3.1 Masques servant à faire la fabrication des résonateurs

La première structure est le résonateur (présentée aux figures 3.2 et 3.3). Les dimensions ont été choisies de manière à avoir une fréquence de résonance de 10 GHz. Cette fréquence est choisie car cela permet de travailler avec du silicium d'une bonne épaisseur. La fréquence visée aurait pu être de 1 GHz, mais cela demande de travailler avec du silicium très épais, ce qui peut être plus complexe. L'épaisseur du silicium, typiquement entre 350 et 600  $\mu\text{m}$ , permet d'obtenir un bon facteur de qualité. Puisque la fréquence de résonance d'une

cavité dépendant des dimensions, il faut augmenter la dimension de la cavité pour diminuer la fréquence de résonance. La fréquence qu'il est théoriquement possible d'atteindre est donc limitée par la dimension des substrats disponibles. Pour l'instant, il existe des substrats jusqu'à 30 cm de diamètre. Par contre, un dispositif de cette taille n'est vraiment pas pratique. À l'inverse, la fréquence maximale aussi est limitée par le dimensionnement du dispositif. Il y a tout de même un nombre minimal de vias qui doivent être utilisés pour fabriquer le résonateur.

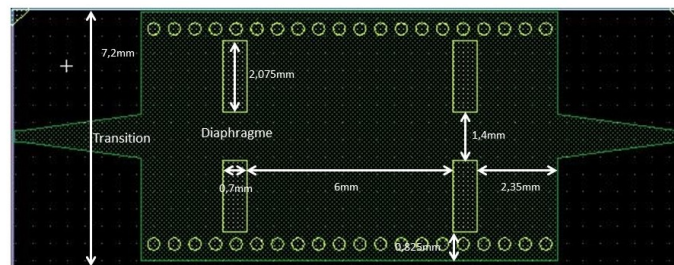


Figure 3.2 Vue agrandie d'un résonateur

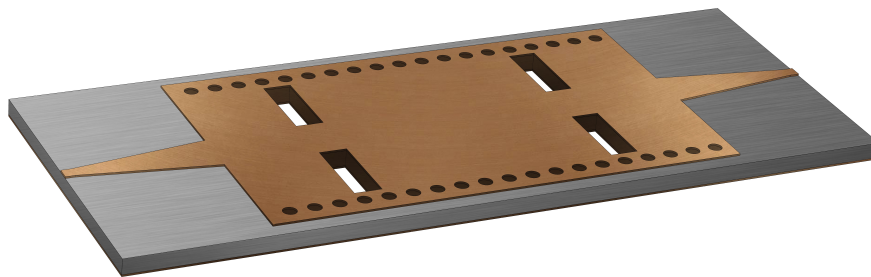


Figure 3.3 Vue conceptuelle d'un résonateur

Les trois résonateurs simples de premier ordre possèdent une cavité de même longueur soit de 6 mm par 7.2 mm de large. Ainsi, pour deux largeurs de diaphragmes différentes, c'est la distance entre ces derniers et le microruban qui change. Celle-ci est faite de manière à avoir une impédance de  $50 \Omega$  afin de bien s'adapter aux appareils de mesures qui seront utilisés. Les vias font  $350 \mu\text{m}$  et sont espacés de  $250 \mu\text{m}$ . La période est donc de  $600 \mu\text{m}$ .

À l'aide des dimensions, il est possible de placer le résonateur sur la figure 2.14. Pour se faire, il faut commencer par calculer la longueur d'onde de coupure ( $\lambda_c$ ). Selon [20],

$$\left(\frac{1}{\lambda_c}\right)^2 = \left(\frac{m}{2x_0}\right)^2 + \left(\frac{n}{2y_0}\right)^2 \quad (3.1)$$

Pour ce résonateur, le mode dominant est un mode  $\text{TE}_{10}$ . Donc en reprenant l'équation 3.1 avec  $m = 1$ ,  $n = 0$  et  $x_0 = 5.55 \text{ mm}$ , on obtient que

$$\lambda_c = 11.1 \text{ mm} \quad (3.2)$$

L'équation précédente est vraie dans le vide, mais dans ce cas-ci, la propagation se fait dans le silicium. Il suffit donc de pondérer la longueur d'onde de coupure par la racine de la permittivité du silicium.

$$\begin{aligned} \lambda_s &= \lambda_c / \sqrt{11} \\ &= 3.347 \text{ mm} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Il est alors possible de calculer les ratios  $p/\lambda_s$  et  $d/\lambda_s$ .

$$\begin{aligned} p/\lambda_s &= 600 \mu\text{m} / 3.347 \text{ mm} \\ &= 0.18 \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} d/\lambda_s &= 350 \mu\text{m} / 3.347 \text{ mm} \\ &= 0.10 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Le point rouge sur la figure 3.4 représente les coordonnées du résonateur. Il se trouve dans la région d'intérêt. Le design est donc robuste et permettra d'obtenir les résultats attendus.

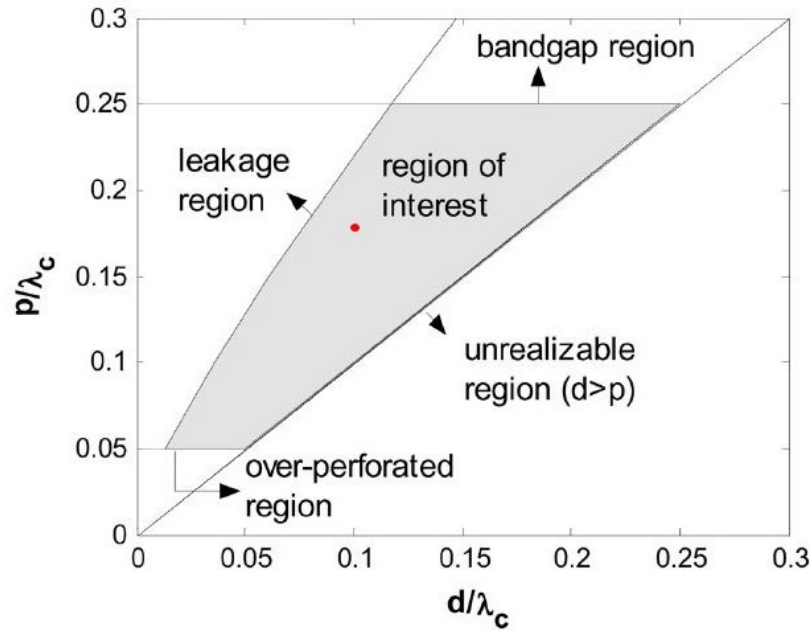


Figure 3.4 Positionnement du résonateur selon les règles de design de [14]

Les lignes à transmissions sont toutes identiques entre elles. La seule différence entre les lignes à transmission et les résonateurs est que les lignes ne possèdent pas de diaphragmes. Les dimensions de celles-ci sont présentées à la figure 3.5.

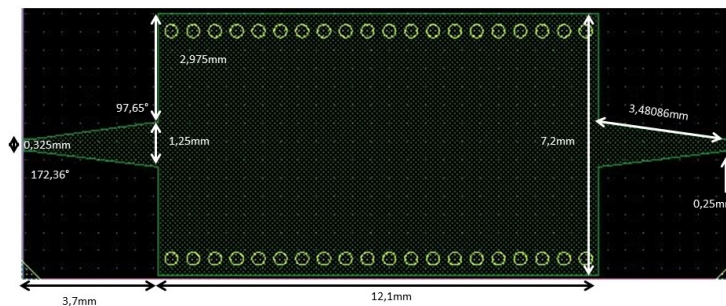


Figure 3.5 Vue agrandie d'une ligne à transmission

Pour ce qui est du résonateur deux couches (voir figure 3.6), les deux parties du résonateur ont les mêmes dimensions, à l'exception de la transition qui se trouve sur une seule des deux parties. Les dimensions sont présentées à la figure 3.7. Pour faire fonctionner ce type de résonateur, il suffit de souder les deux parties ensemble. Tout comme pour le résonateur simple, ce design-ci est un filtre avec diaphragme (figure 2.17) et possède une topologie de type GIS demi-mode (figure 2.10). Pour ces résonateurs, la transition est différente, puisqu'elle est faite à l'aide d'une sonde de courant (figure 2.18).

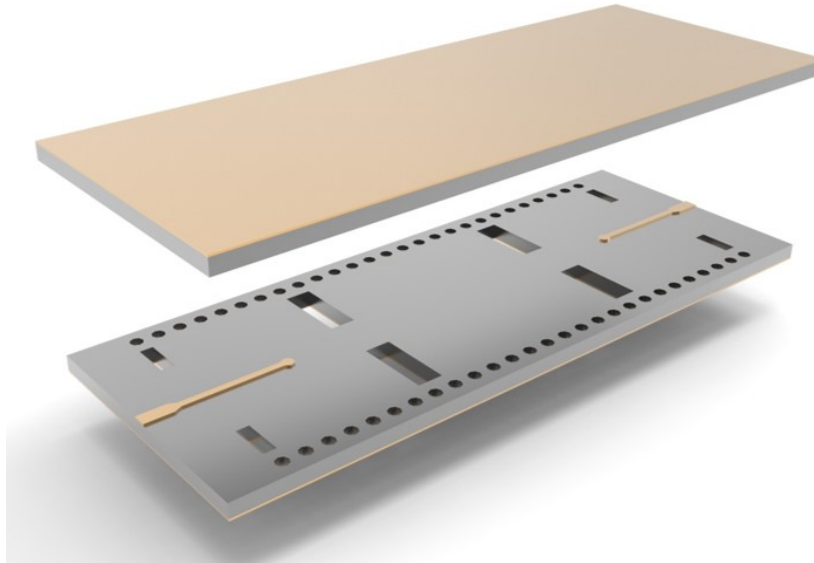


Figure 3.6 Vue conceptuelle d'un résonateur deux couches

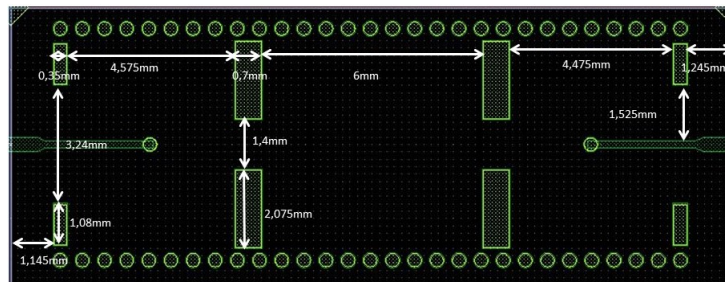


Figure 3.7 Vue agrandie d'un résonateur deux couches

La ligne à transmission deux couches est faite sur le même principe que le résonateur. Les dimensions sont présentées à la figure 3.8.

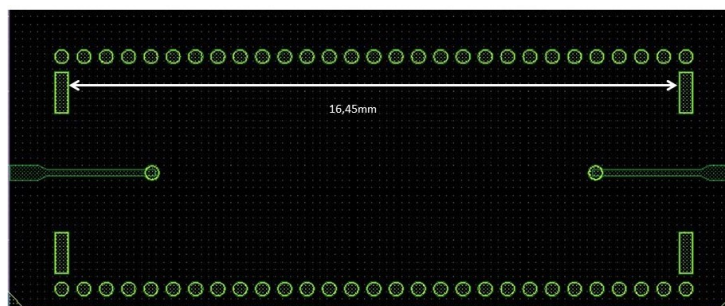


Figure 3.8 Vue agrandie d'une ligne à transmission deux couches

## 3.2 Choix des matériaux

### 3.2.1 Choix du substrat

Afin qu'un dispositif GIS agisse comme une cavité, il faut que le substrat agisse comme un diélectrique. Il existe en microfabrication deux substrats principaux soit, l'arséniure de gallium et le silicium. Pour un résonateur de type coplanaire, le silicium permet d'obtenir un facteur de qualité de l'ordre de  $10^6$  [31], par rapport à un facteur de qualité de l'ordre de  $10^4$  [1] pour l'arséniure de gallium. Ce sera donc le silicium qui sera utilisé. Pour ce projet, c'est un résonateur GIS qui sera fabriqué. Dans ce type de résonateur, contrairement au résonateur coplanaire, tout le signal passe dans le substrat. Pour avoir une idée du facteur de qualité, il faut donc regarder des pertes diélectriques ( $\tan(\delta)$ ). Cette valeur varie en fonction de la température et de la fréquence d'utilisation. Pour une température de l'ordre de 1 K et une fréquence de l'ordre de 10 GHz,  $\tan(\delta) \approx 10^{-4}$  [22]. Comme le facteur de qualité est inversement proportionnel à cette valeur, le facteur de qualité supérieur qu'il serait possible d'atteindre est de 10000.

Le silicium s'avère aussi être un meilleur choix puisqu'il est plus facile d'y faire des trous bien contrôlés avec des parois droites. Toutefois, il faut que le substrat de silicium choisi ait une grande résistivité. Plus la résistivité sera grande et moins les pertes reliées au substrat seront importantes. Pour une raison de coût et de disponibilité, des substrats

**3.2.2 Choix des métaux supraconducteurs**

Le silicium est un matériau semi-conducteur. Dans ce projet, il est utilisé comme substrat. Le choix du matériau pour les électrodes est crucial. Les métaux supraconducteurs sont utilisés pour les électrodes car ils ont une résistance nulle à basse température. Les matériaux les plus couramment utilisés sont l'aluminium, le niobium et le titane. Le choix du matériau dépend de la température de fonctionnement et de la fréquence. L'aluminium est le plus courant car il est facile à déposer et a une température de transition élevée. Le niobium est utilisé pour des applications à plus basse température. Le titane est utilisé pour des applications à très basse température. Les métaux supraconducteurs sont déposés sur le substrat de silicium par des méthodes de dépôt telles que l'électroplacage et le dépôt électrochimique en solution aqueuse. Contrairement à d'autres méthodes de dépôt, comme l'évaporation, celles-ci ne sont pas dépendantes de l'angle entre la source et le substrat.

Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIII			Ib	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	O
1 H																1 H	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Ku														

Figure 3.9 Métaux qui peuvent être déposés de manière électrochimique, les métaux supraconducteurs sont surlignés en orange [21].

Ia	IIa	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIII			Ib	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	O
1 H																1 H	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Ku														

Figure 3.10 Métaux qui peuvent être déposés par électroplacage, les métaux supraconducteurs sont surlignés en orange [21].

Le métal choisi doit être supraconducteur et avoir une température de transition supérieure à la température d'opération du qubit, soit entre 15 mK et 50 mK. Les métaux qui peuvent être déposés de manière électrochimique sont présentés à la figure 3.9 et ceux qui se plaquent par électrochimie sont présentés à la figure 3.10. Plus la température de transition est grande, plus le courant et le champ critique seront grands. Un grand courant et un grand champ critique facilitent l'utilisation du dispositif. Selon le tableau 3.1, le technétium semble le meilleur choix en regard à sa température de transition élevée. Toutefois, cet élément est rare et radioactif, c'est pourquoi cette option est écartée. En raison de sa toxicité, le plomb est également écarté. Parmi les autres choix, l'étain est celui qui est le plus fréquemment utilisé en microfabrication. Puisque l'électroplacage permet

Élément	Température de transition (K)	Commentaire
Ir	0,14	Transition très basse
Cd	0,52	Transition très basse
Os	0,65	Transition très basse
Zn	0,855	
Mo	0,92	
Ga	1,083	
Tl	2,39	
Re	2,4	
In	3,4	
Sn	3,72	Courant en microélectronique
V	5,03	
Pb	7,19	Toxique
Tc	7,46	Radioactif

Tableau 3.1 Température de transition des différents métaux supraconducteurs qui peuvent être plaqués classés selon leur température de transition[24].

d'obtenir une meilleure épaisseur de dépôt, c'est la méthode qui sera employée.

Avant de commencer la fabrication des résonateurs supraconducteurs, il a été décidé qu'un prototype en cuivre sera conçu et utilisé pour tester la méthode de fabrication et de caractérisation. Le choix du cuivre a été retenu car il s'agit d'un métal facile à électroplaquer et bien connu. Le procédé sera ensuite adapté pour l'étain.



# CHAPITRE 4

## CADRE EXPÉRIMENTAL

### 4.1 Fabrication des résonateurs

Afin de faciliter la lecture, tous les procédés détaillés se trouvent dans l'annexe A

#### 4.1.1 Gravure ASE

Avant de plaquer du métal sur la surface des échantillons, il faut commencer par créer le motif des résonateurs. Puisque le métal doit se trouver dans les TSVs composants les murs des résonateurs, il faut commencer par faire les TSVs. La gravure est faite dans un ASE (Advanced Silicon Etching). Cet appareil fait une gravure profonde à l'aide d'un plasma de  $\text{SF}_6$ . Le masque de cette gravure est fait à l'aide d'une double couche d'AZ P4903. Cette résine est exposée en utilisant le masque présenté à la figure 4.1. Après la gravure et le nettoyage de la résine restante, l'échantillon est prêt pour le placage du métal.

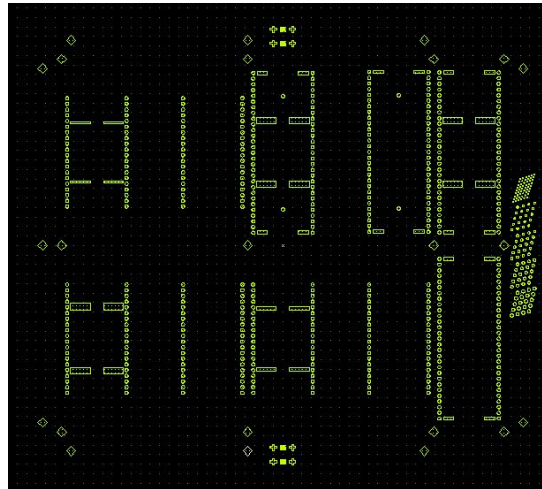


Figure 4.1 Masque utilisé pour la gravure ASE, les zones jaunes sont les zones claires du masque.

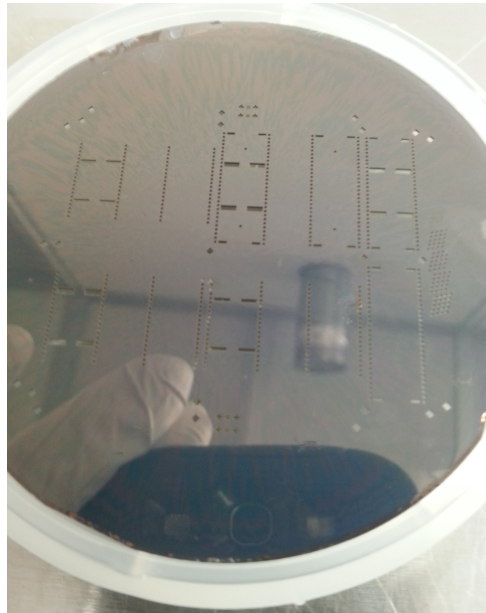


Figure 4.2 Échantillon à sa sortie de l'ASE avant le nettoyage de la résine restante.

#### 4.1.2 Résonateurs en cuivre

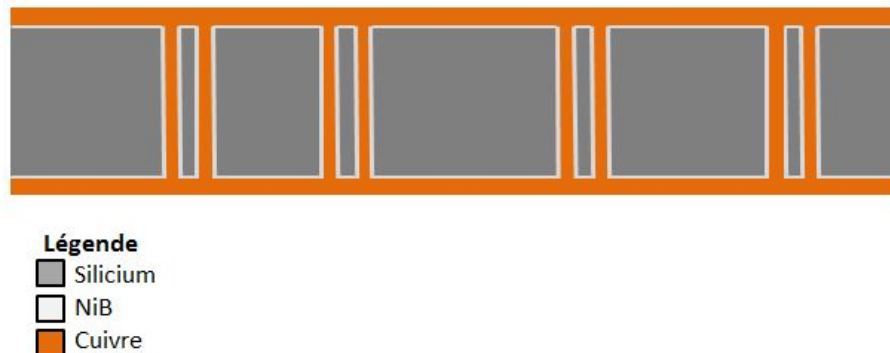


Figure 4.3 Vue en coupe d'un résonateur à la suite du placage.

Pour être en mesure de plaquer du cuivre sur du silicium, il faut une couche conductrice qui sert d'accroche ainsi qu'une barrière servant à contrer la migration du cuivre dans le silicium. Afin de répondre à ces deux contraintes, nous avons déposé une barrière de NiB à l'aide d'une solution développée par Aveni. Cette solution a été développée dans le but de remplir des TSVs de cuivre. La barrière se dépose à l'aide de deux immersions consécutives. La première sert à activer la surface de l'échantillon. L'activation doit être faite sur une surface d'oxyde de silicium pour être optimale, mais cela fonctionne aussi sur le silicium à condition de faire le bon traitement, soit de faire un nettoyage Piranha- $H_2O$  :  $HF$ -SC2-Piranha. La deuxième immersion fait un dépôt de NiB de manière autocatalytique. Ces

étapes se font à température élevée dans un bain-marie tel que présenté à la figure 4.4. L'échantillon est maintenant prêt pour le placage de cuivre sur les deux faces. Celui-ci sera fait à l'aide d'une solution commerciale de pH neutre fournie par Aveni, le montage est présenté à la figure 4.5 et le résultat est présenté à la figure 4.6. Le cuivre manquant sur la tranche est causé par une mauvaise activation. L'échantillon n'a pas été submergé assez longtemps à certains endroits lors de l'activation.

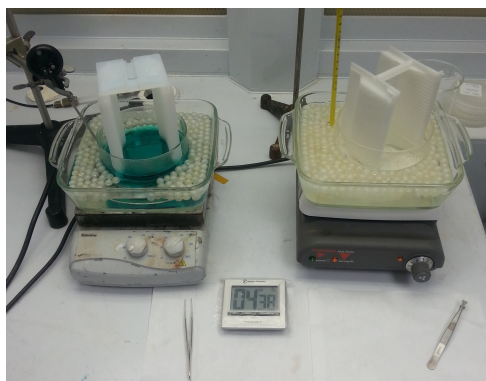


Figure 4.4 Montage servant à faire le NiB. La solution à droite est celle d'activation alors que celle de gauche est celle servant à faire la déposition autocatalytique.

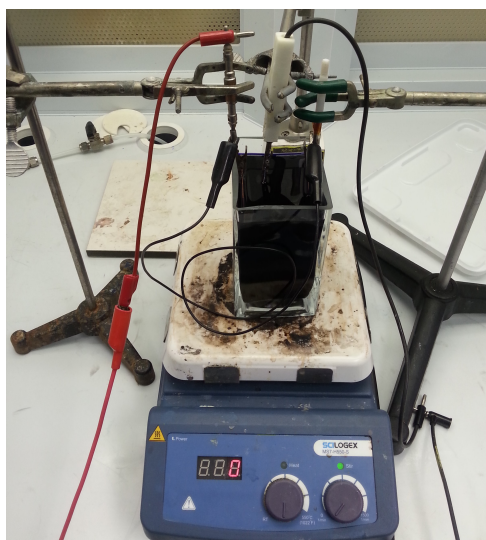


Figure 4.5 Montage servant à faire le placage de cuivre.

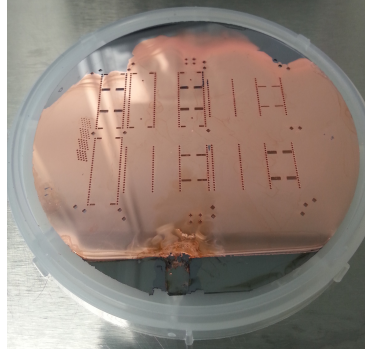


Figure 4.6 Échantillon plaqué de cuivre.

Suite au placage, une gravure du cuivre doit être faite afin de former les transitions. Étant donné que le métal doit être conservé dans les TSVs et dans les diaphragmes, il faut les masquer durant la gravure. Comme les TSVs et les diaphragmes représentent de grandes ouvertures, il n'est pas aisé de les masquer. En effet, une résine liquide ne sera pas efficace puisque les gravures traversent complètement le substrat. Une alternative possible à cet obstacle est l'utilisation de dry film. Le choix s'est porté sur un dry film négatif, soit le MX5050 de DuPont de 50  $\mu\text{m}$  d'épais. Le dry film doit être appliqué des deux côtés de l'échantillon. Comme il s'agit d'une gravure humide, il faut aussi protéger le dessous de l'échantillon pour conserver le métal dans les TSVs, mais il faut aussi conserver le métal sous l'échantillon puisque cette face sert aussi de mur. La photolithographie de la face avant est faite en utilisant le masque présenté à la figure 4.7. Aucune photolithographie n'est faite sur la face arrière, tout le métal devant être conservé lors de la gravure. Celle-ci est faite par immersion dans le Chrome Etch. On peut s'assurer que le cuivre est bien présent dans les TSVs et dans les diaphragmes en observant les faces intérieures à l'aide d'une caméra optique qui permet une observation à angle grâce à un système de miroirs. Les images prises grâce à cette caméra sont présentées à la figure 4.8.

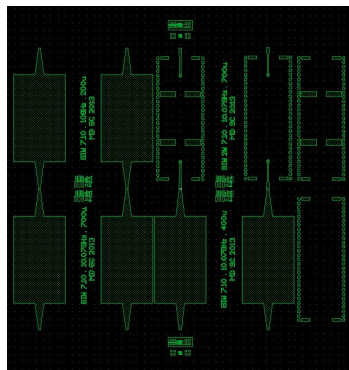


Figure 4.7 Masque utilisé pour la photolithographie du dry film, les zones vertes correspondent aux zones opaques du masque.

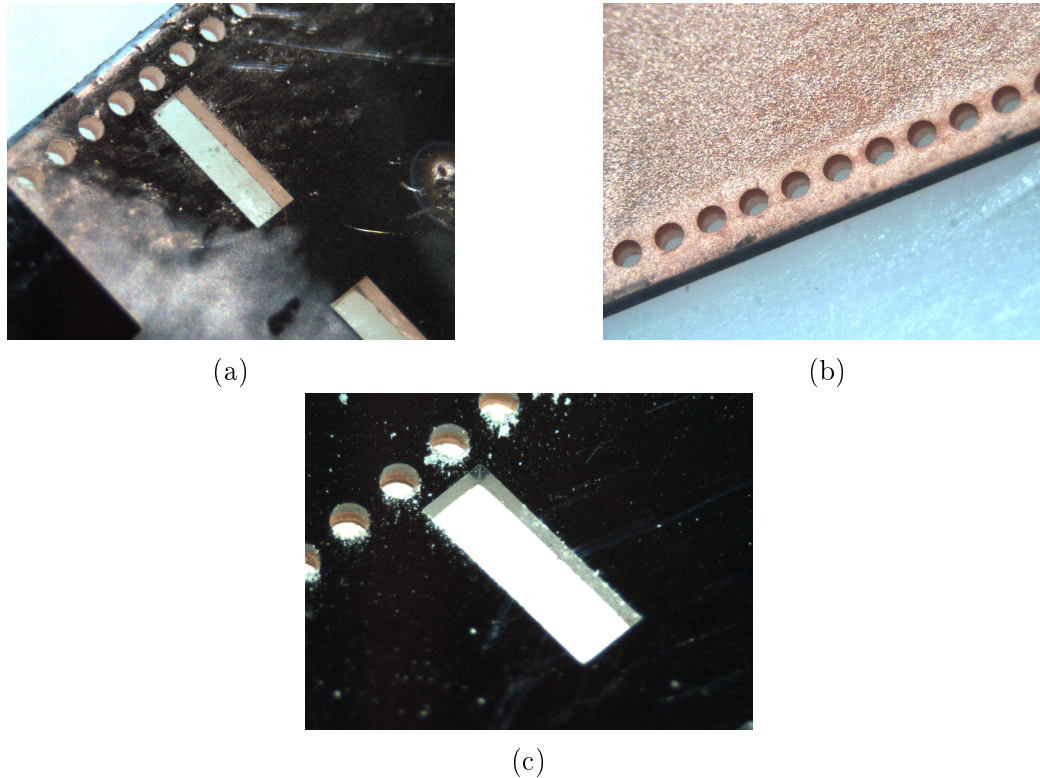


Figure 4.8 Observation des TSV à la caméra optique 3D. (a) TSV avec cuivre vu du dessus. (b) TSV avec cuivre vu du dessous. (c) TSV dont le cuivre a été gravé involontairement.

Finalement, il ne reste plus qu'à singulariser les résonateurs. Pour se faire, une découpe laser (LPKF) est faite de manière à couper des carrés ajustés à la longueur des résonateurs et des lignes à transmission. La coupe est faite de manière à pouvoir souder les échantillons dans le porte-échantillon tel que montré à la figure 4.20.

### 4.1.3 Résonateurs en étain

Suite aux résultats concluants de la caractérisation des résonateurs en cuivre présentés à la section 5.2, la fabrication des résonateurs en étain a été entamée. Une première tentative de placage en utilisant le NiB comme couche d'accroche dans une solution commerciale a été faite. Contrairement à la solution de placage de cuivre utilisée qui est neutre (pH de 7), celle d'étain a un pH de 1. Cette différence de pH a rendu le placage difficile puisque le NiB se grave très rapidement s'il est immergé dans une solution acide. Le taux de gravure est si important que le NiB se grave avant même que le placage d'étain ne commence. Pour contrer ceci, un placage à chaud a été tenté. Un placage à chaud consiste à mettre le courant sur l'échantillon avant de le plonger dans la solution. Ceci a comme effet de commencer le placage plus rapidement et donc de laisser moins de temps à la solution pour graver l'échantillon. Malgré l'introduction à chaud de l'échantillon, le taux de gravure était

encore trop important. Il a donc été décidé de réessayer de plaquer à chaud, mais cette fois en doublant le courant pour la première minute afin de favoriser le placage malgré une baisse de l'uniformité. Tel qu'il est possible de le voir sur la figure 4.9a, cette méthode a permis de plaquer de l'étain en utilisant le NiB. Par contre, le placage n'est pas uniforme, il est donc impossible de faire des résonateurs dans ces conditions. Ces stries pourraient être dues à une mauvaise répartition du courant sur l'échantillon. Puisque la pince utilisée pour tenir l'échantillon dans la solution de placage possède des dents, la densité de courant peut changer. Il est possible d'amoindrir cet effet en collant du ruban de cuivre sous la pince. La présence du ruban aide à l'uniformité telle que présentée à la figure 4.9b, mais il y a toujours des stries sur l'échantillon.



Figure 4.9 Placage d'étain dans une solution commerciale acide. (a) Placage à chaud en doublant le courant pour la première minute. (b) Placage à chaud en doublant le courant pour la première minute et en utilisant un ruban de cuivre.

Malgré de nombreux essais et ajustements, il n'a pas été possible de plaquer de l'étain uniforme sur le NiB à l'aide de la solution commerciale. C'est pourquoi nous avons fait une solution à base de citrate de sodium tribasique et de chlorure d'étain dont le pH est de 5.7. Cette solution a permis de plaquer de l'étain. Par contre, l'adhésion n'était pas parfaite. La couche d'étain décollait parfois lors du rinçage à l'eau. Des tests de gravure ont été faits même si l'adhésion n'était pas parfaite.

Un morceau de ruban Kapton a été placé au centre de l'échantillon lors du placage pour être capable de mesurer l'épaisseur d'étain à l'aide du profilomètre. Les échantillons ont ensuite été immergés dans différentes solutions. Trois solutions de gravure ont initialement été testées: le Chrome Etch, une solution de HF:HCl de concentration 1:1 et une solution de HF diluée dans l'eau[35]. Les résultats sont présentés à la figure 4.10.



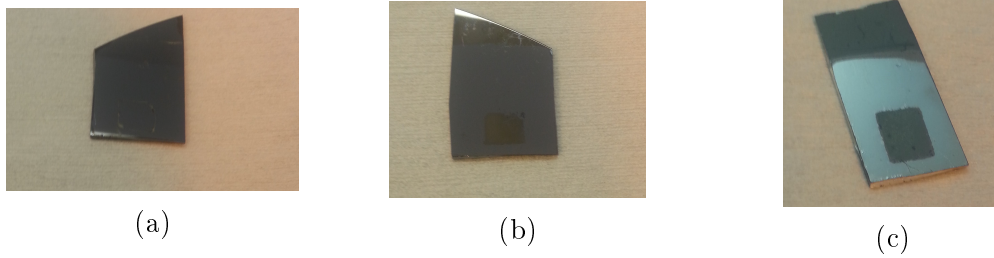


Figure 4.10 Gravure faite dans (a) Chrome Etch (b) HF:HCl et (c)HF:H<sub>2</sub>O

Le Chrome Etch grave l'étain, mais très lentement. Un test a été refait avec du dry film et ce dernier est attaqué de manière importante avant que la gravure de l'étain ne soit terminée. Pour ce qui est de la solution de HF:HCl, le taux de gravure est bien et un test a aussi été fait avec du dry film. Comme il s'agit d'une gravure acide, le NiB aussi est attaqué. Celui-ci s'est même gravé plus rapidement que l'étain, ce qui a comme effet de détacher l'étain en flocon et entraine parfois le dry film avec l'étain. Pour ce qui est de la solution de HF diluée, même après 30 min, l'étain n'était pas complètement gravé. Après observation au MEB de l'étain, il est possible de voir à la figure 4.11a que les grains d'étain sont assez grossiers. Pour adoucir la rugosité des grains d'étain lors du placage, de la gélatine a été ajoutée à la solution de placage [37]. À la figure 4.11b se trouve une observation au MEB d'étain plaqué avec l'ajout de gélatine. L'échelle n'est pas la même sur les deux images, mais les grains ont environ les mêmes dimensions.

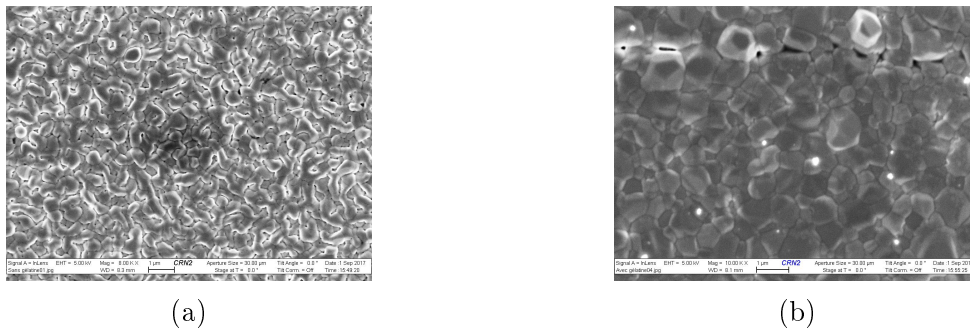


Figure 4.11 Effet d'ajouter de la gélatine dans la solution de placage.

À ce point-ci, une mesure électrique de supraconductivité a été faite. Puisqu'aucune supraconductivité n'a été observée, des mesures EDX ont été faites afin de vérifier la composition de l'étain plaqué. Nous avons également fait une mesure de susceptibilité magnétique qui cette fois a permis d'observer de la supraconductivité. Les résultats de toutes ces mesures se trouvent à la section 5.1.

Une nouvelle tentative pour plaquer de l'étain à l'aide d'une solution dont le pH est d'environ 1 a été faite. Pour mieux comprendre l'effet du pH, deux échantillons ont été plaqués. Puisque la préparation d'échantillon de silicium avec NiB demande plusieurs manipulations, les tests ont été faits sur des feuilles de cuivre. En effet, puisque le cuivre est conducteur, il est facile de le plaquer et cela ne demande aucune préparation de surface. La première a été plaquée dans une solution commerciale acide de pH 1 et la deuxième dans la solution maison de pH 5.7. Il est possible de voir la différence de grain à la figure 4.12.

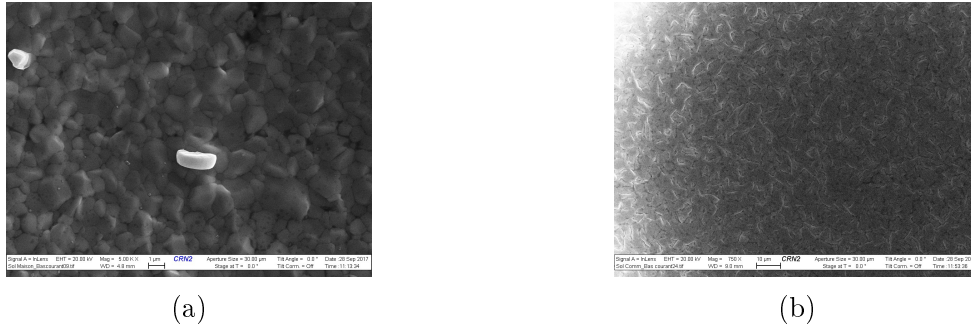


Figure 4.12 (a) Solution maison de pH 5.7 (b) Solution commerciale de pH 1

Suivant les recommandations d'Aveni, un recuit du NiB de 10 min à 200 °C a été fait. Ce recuit permet au NiB de mieux résister à l'acidité de la solution de placage. Toutefois, même si l'adhérence semble mieux lors du placage, la gravure est toujours difficile. En effet, selon Shang [32], l'étain se grave bien lorsqu'il est immergé dans du HCl d'une concentration de 30%. Or, le HCl attaque le NiB plus rapidement que l'étain. La gravure n'est donc pas nette et forme des flocons d'étain. Il n'est donc pas possible d'avoir une belle gravure permettant d'obtenir les formes désirées pour faire les résonateurs.

Puisque la méthode utilisée ne permet pas de déposer une couche d'accroche qui adhère adéquatement, permettant de plaquer et de graver de l'étain, il faut trouver une autre méthode. La première méthode testée est un dépôt par évaporation d'étain. Cette méthode n'était pas concluante car la gravure de l'étain par le HCl n'était pas réussie. L'étain se déformait avant de se détacher de la surface du substrat sous la forme de flocons. Donc impossible de bien faire la gravure pour obtenir les formes désirées. L'autre méthode consistait à déposer de l'or (figure 4.13) par évaporation puis de s'en servir comme couche d'accroche. Par contre, l'or n'a pas une bonne adhérence sur le silicium. Pour remédier à ceci, il est possible de déposer une fine couche d'un métal offrant une bonne adhérence à l'or tout en ayant lui-même une bonne adhérence sur le silicium. C'est le cas du chrome. Pour



ne pas interférer avec les résultats électriques, la couche d'accroche doit être la plus mince possible. L'épaisseur de chrome minimale qu'il est possible de déposer pour pouvoir faire un dépôt d'or par la suite est de 60 nm. C'est ce qui a été fait. Pour ce qui est de la couche d'or, le dépôt faisait 100 nm, ce qui correspond à un dépôt permettant de bien faire de l'électroplaquage par la suite. L'or étant très peu affecté par les solutions acides, la couche résiste très bien dans la solution de placage commercial acide (figure 4.14). L'adhésion de l'étain est donc très bonne. À ce moment-ci de la fabrication, un test de supraconductivité a été fait sur l'échantillon pour trouver sa température de transition. Les résultats de cette mesure se trouvent à la section 5.1. Étant donné les résultats positifs, la fabrication s'est poursuivie en utilisant cette technique. Le comportement de la gravure de HCl dilué est particulier. Au lieu de se faire uniformément sur toute la surface, la gravure commence à la frontière entre l'or non plaqué et l'étain. Ensuite, la gravure avance sur un front tout au long de l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit complètement gravé tel que présenté à la figure 4.15. Malgré la particularité de la gravure, le résultat obtenu est le bon. Il est important de noter que l'or se grave là où il y a de l'étain, mais reste intact ailleurs. Selon Green [18], la solution la plus utilisée pour graver de l'or est faite d'acide hydrochlorique et nitrique. Il n'est donc pas surprenant que l'or se soit gravé en même temps que l'étain surtout que la couche d'or est très mince. Il n'est donc pas nécessaire de faire une autre gravure pour enlever l'or qui aurait pu rester à des endroits non désirés. Une fois la gravure de l'étain faite au HCl, le restant de la procédure de fabrication est la même que pour les résonateurs en cuivre. C'est-à-dire qu'il faut singulariser les résonateurs à l'aide d'une découpe laser (figure 4.16).

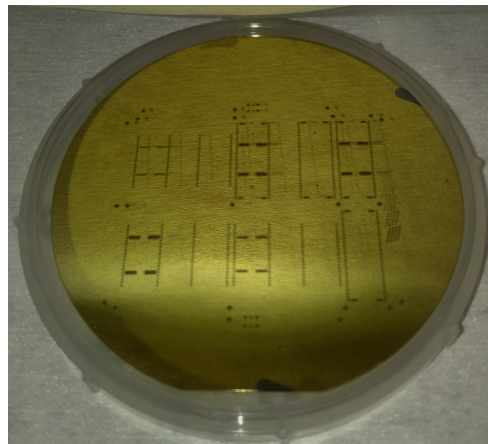


Figure 4.13 Échantillon de silicium suite au dépôt d'or.

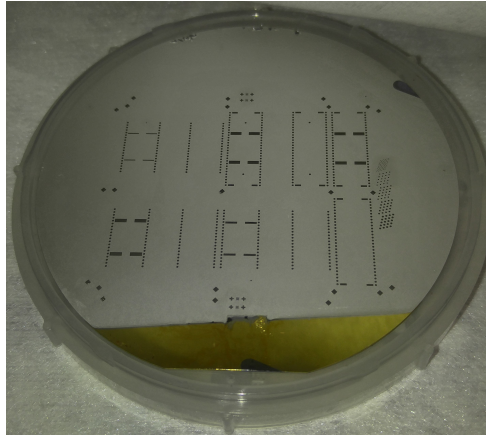


Figure 4.14 Échantillon de silicium suite au placage de l'étain.

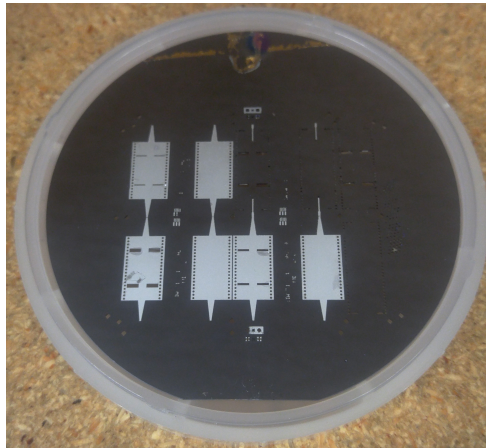


Figure 4.15 Résonateurs suite à la gravure de l'étain.

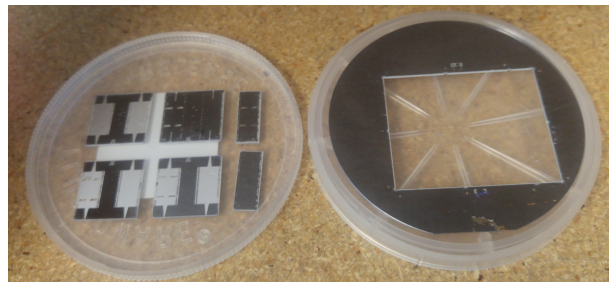


Figure 4.16 Singularisation des résonateurs.

## 4.2 Montage pour mesure de résistivité

La mesure de résistivité a pour but de trouver la température de transition de l'étain plaqué. Il faut donc trouver une méthode qui permet de mesurer la résistance de l'échantillon seulement, sans qu'elle soit affectée par les câbles. Il est possible de faire ceci à l'aide

d'une mesure à quatre pointes. Deux des pointes servent à injecter le courant alors que les deux autres mesurent la tension. Cette mesure sera prise à l'aide d'un interposeur. Ce dernier est fait d'une matrice de ressorts conducteurs soudés sur un PCB où le contact électrique est fait par ces ressorts. Une pièce métallique vient coincer l'échantillon contre la matrice de ressorts afin d'avoir un bon contact. À la figure 4.17 se trouve l'interposeur, l'échantillon se trouve derrière la pièce métallique avec les deux vis.

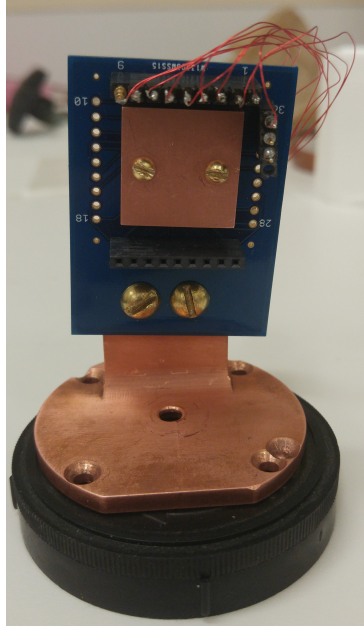


Figure 4.17 Interposeur utilisé pour faire la mesure quatre pointes.

L'interposeur est ensuite fixé sur la canne. Celle-ci servira à mettre le tout dans le fond du VTI (variable temperature inserts). Ce dispositif possède une chambre dans laquelle de l'hélium liquide est introduit. Il est aussi possible de pomper sur la chambre pour diminuer la température. Le dispositif utilisé dans ce projet permet de descendre en température jusqu'à 1.5 K. Les résultats de ces mesures se trouvent à la section 5.1.



Figure 4.18 Canne utilisée pour mettre l'échantillon dans le VTI.

### 4.3 Montage pour les mesures micro-ondes à température ambiante

Les paramètres intéressants à caractériser pour un résonateur sont la fréquence de résonance et le facteur de qualité. Puisque les résonateurs ont une fréquence de résonance théorique de 10 GHz, la caractérisation se fera de 8 à 12 GHz. Puisqu'un des objectifs du projet est de voir l'effet de la supraconductivité, cette mesure devra être faite à basse température. Cependant, les premières mesures seront plutôt faites à température ambiante. Les mesures prises sur les résonateurs en cuivre doivent permettre de vérifier que ceux-ci fonctionnent bien avant de faire la fabrication des résonateurs en étain. Ensuite, les résonateurs en étain seront mesurés à température ambiante afin d'éliminer ceux qui sont défectueux. De manière générale, les échantillons sont soudés dans leur porte-échantillon afin d'avoir le meilleur contact possible. Par contre, le nombre d'échantillons à tester est grand, cela prend une méthode qui permet de facilement changer d'échantillons, ce que la soudure ne permet pas. Anritsu a commercialisé une fixture permettant de faire ce type de mesure. La fixture est présentée à la figure 4.19.

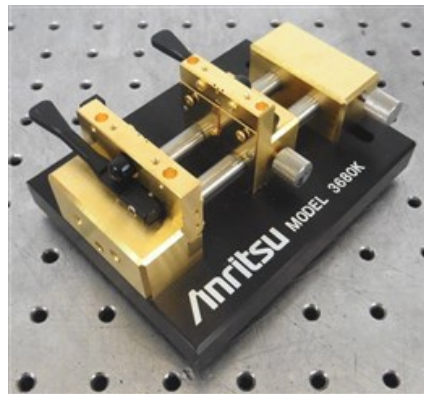


Figure 4.19 Fixture utilisée pour faire les mesures fréquentielles à température ambiante.

Cette fixture possède deux mâchoires qui maintiennent l'échantillon à tester en place. Dans chaque mâchoire se trouve une aiguille reliée à un connecteur SMA permettant de faire la transmission. Le changement d'échantillon par l'ouverture des mâchoires est facile à faire. Cependant, le contact peut parfois être mauvais. Il faut s'assurer que le conducteur est bien placé sur l'échantillon. Un petit déplacement peut faire de grandes différences sur les courbes obtenues.

---

## 4.4 Montage pour les mesures micro-ondes à froid

Dans le cadre de sa maîtrise, François Michaud [27] a utilisé un porte-échantillon. Le même porte-échantillon sera utilisé puisqu'il avait été pensé pour accueillir des résonateurs SIW. Celui-ci est présenté à la figure 4.20. De chaque côté se trouvent deux connecteurs SMA. Le conducteur central traverse la paroi de manière à arriver tout juste à l'intérieur du porte-échantillon. Un connecteur en or est placé autour du conducteur, puis une soudure est faite entre le connecteur en or et l'échantillon afin de faire le contact électrique. En raison de la petite taille des connecteurs (environ la largeur d'un conducteur de SMA), il n'est pas facile de faire une bonne soudure. C'est pourquoi de la pâte d'étain est utilisée pour effectuer cette soudure sur les résonateurs en cuivre. Pour ce faire, il suffit d'étendre la pâte puis de faire un recuit. Puisque le NiB est sensible à la chaleur, si le recuit est trop agressif, il y aura détérioration du dispositif. À la figure 4.20 se trouve un échantillon ayant subi un recuit qui a détérioré quelque peu le cuivre. Il est toutefois encore possible de faire des mesures sur l'échantillon, mais les résultats ne sont probablement pas aussi bons qu'avant le recuit.

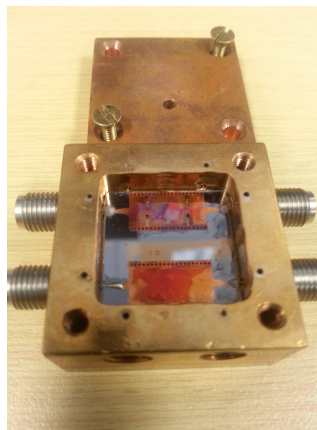


Figure 4.20 Échantillon en cuivre fixé dans le porte-échantillon.

Pour les résonateurs en étain, il faut trouver un autre métal pour faire la soudure. Nous avons tenté, sans succès, de souder avec de l'indium, avant d'employer de la laque d'argent qui ne nécessite pas de recuit ni de soudure. Sur la figure 4.21, on voit la laque d'argent, ainsi que le conducteur SMA et le connecteur en or.

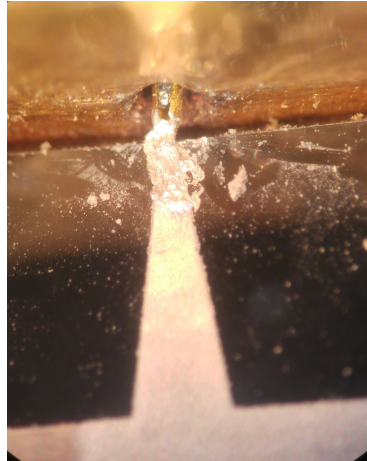


Figure 4.21 Échantillon en étain fixé avec de la laque d'argent.

#### 4.4.1 Calibration

La prise de donnée recueillera les paramètres  $S_{ij}$ , pour  $i = 1, 2$  et  $j = 1, 2$ . Ce paramètre est exprimé en dB. Il fait le ratio entre le signal émis ( $j$ ) et le signal reçu ( $i$ ). Pour mesurer ces paramètres, c'est un PNA qui est utilisé. Cet appareil vient avec son module de calibration. Par contre, ce module ne peut pas être refroidi. Cela veut donc dire que la calibration sera faite à température ambiante, mais qu'elle ne sera pas refaite lors du refroidissement. Ainsi, il y a de fortes chances que les mesures soient affectées par le refroidissement des câbles du système de mesure.

# CHAPITRE 5

## CARACTÉRISATION

### 5.1 Évaluation de la supraconductivité de l'étain

Comme discuté à la section 4.1.3, une mesure électrique a été faite sur l'échantillon obtenu suite au placage avec la solution de pH 5. La mesure est faite à l'aide de quatre pointes dans un VTI permettant de descendre jusqu'à 1.5 K. La mesure a été faite en détection synchrone (Lock-in) à environ 100 Hz. Les résultats sont présentés à la figure 5.1.

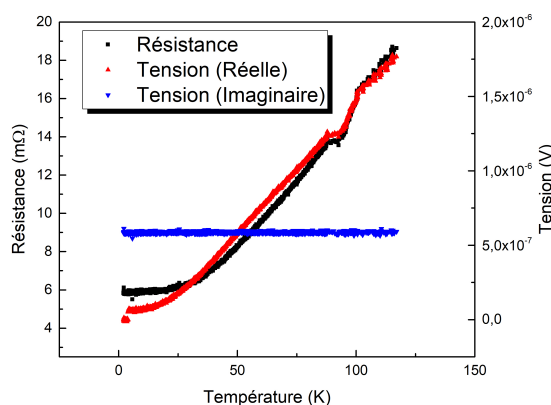
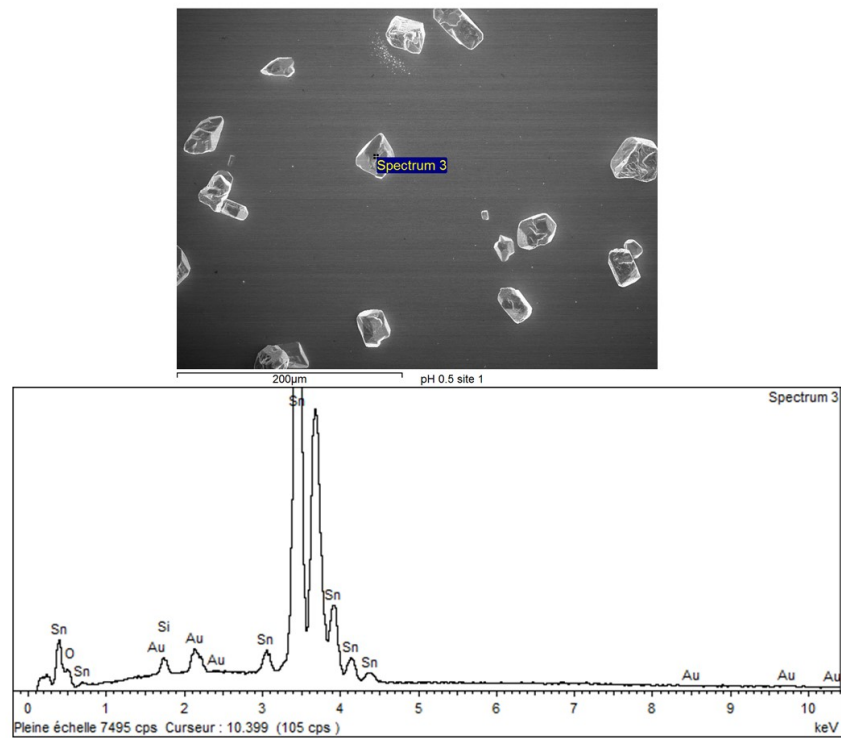


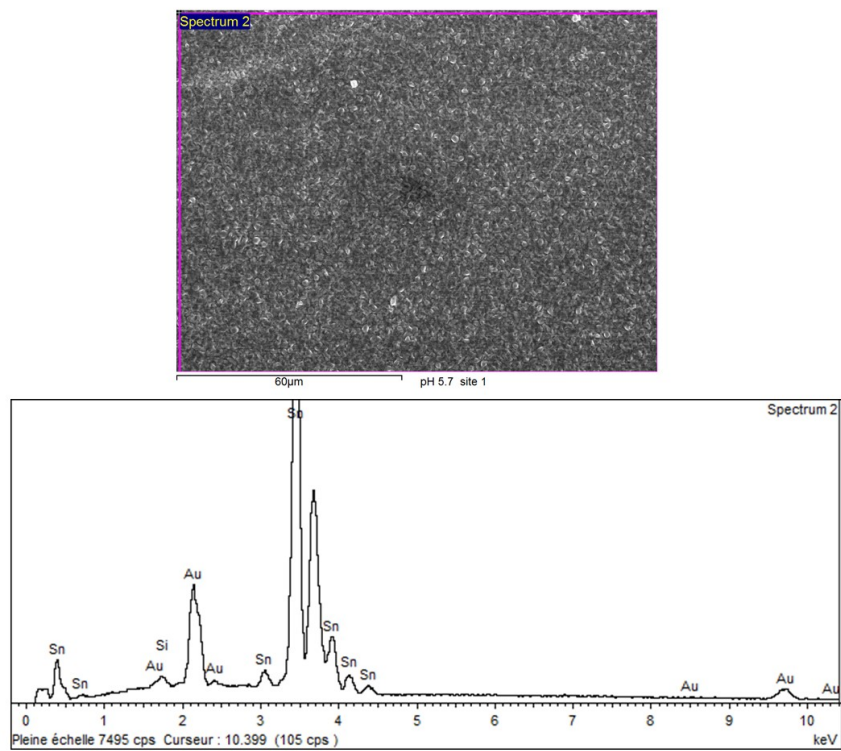
Figure 5.1 Mesure de résistivité électrique à quatre pointes.

La résistance diminue avec la température comme tous les métaux. Par contre, la résistance ne tombe pas à zéro comme attendu. L'échantillon n'est pas supraconducteur. Toutefois, en regardant la partie réelle de la tension, il semble avoir une baisse soudaine à 3.8 K, ce qui correspond à la température de transition de l'étain. Cette transition n'apparaît pas dans la résistance puisque la partie imaginaire est constante et plus importante que la partie réelle. Une hypothèse qui pourrait expliquer l'absence de supraconductivité est la présence de contaminant organique. La présence de contamination a comme effet de diminuer la température de transition supraconductrice d'un élément ou même de détruire la phase supraconductrice. Afin d'identifier les éléments présents sur l'échantillon, une mesure EDX est faite.





(a)



(b)

Figure 5.2 EDX pour des solutions de placage de (a) pH 1 et (b) pH 5.7



Suite à la première mesure de résistivité qui n'a pas permis de voir de transition supraconductrice, une mesure EDX a été faite. Cette mesure permet d'identifier tous les éléments présents à la surface de l'échantillon. En se fiant au diagramme de Pourbaix de l'étain (figure 5.3) qui indique les éléments déposés lors du placage en fonction du pH et du potentiel d'équilibre, il est possible que se soit de l'oxyde d'étain qui se soit déposé et non de l'étain pur. Deux échantillons ont été comparés. Les deux échantillons ont été plaqués sur une amorce d'or. Le premier échantillon a été plaqué à l'aide d'une solution commerciale dont le pH est de 1 et le deuxième échantillon a été plaqué avec la solution utilisée lors de la mesure électrique présentée à la figure 5.1. À la figure 5.2a se trouvent les résultats pour la solution avec un pH de 1. Le placage n'est pas uniforme puisque la solution est trop âgée, le placage ne fait que déposer des grains d'étain et non une couche uniforme. Par contre, en faisant un spectre sur une des granules, il est possible de voir que l'étain est l'élément présent en plus grande quantité. Viens ensuite l'or et une petite trace d'oxygène. Le spectre de la solution maison est présenté à la figure 5.2b. Tout comme l'autre échantillon, il n'y a que de l'étain et de l'or. Pour cet échantillon, il n'y a pas de présence d'oxygène. Lorsqu'il y a des traces d'oxygène, les raies se trouvent à 0.5 keV. L'or semble présent en plus grande quantité, mais cela s'explique par le fait que le spectre a été pris sur une plus grande zone que pour l'autre échantillon. Suite à cette mesure, il est possible de dire que l'étain plaqué contient très peu de contaminants.

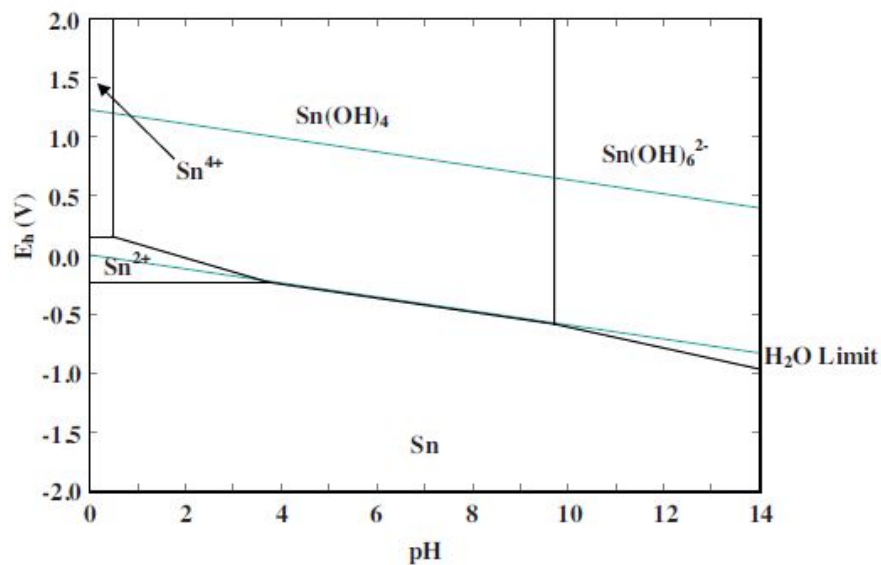


Figure 5.3 Diagramme de Pourbaix de l'étain.

Il existe une deuxième méthode permettant de montrer qu'un échantillon devient supraconducteur. Il s'agit de faire une mesure de susceptibilité magnétique. Le résultat de cette mesure se trouve à la figure 5.4.

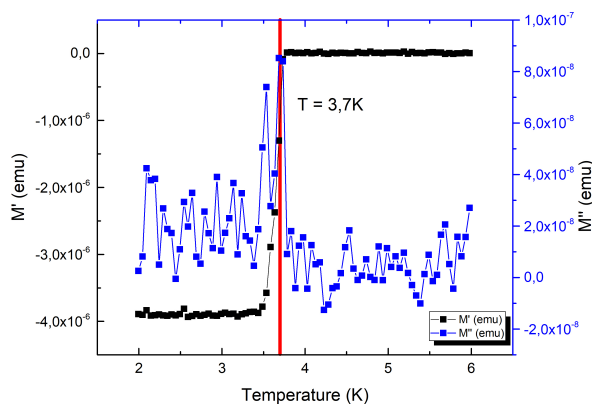


Figure 5.4 Mesure de susceptibilité magnétique d'un échantillon d'étain.

Une transition dans la susceptibilité apparaît à 3.7 K, soit la température critique de l'étain. Puisqu'un supraconducteur agit comme un diamagnétique parfait,  $M' = 1$ . Dans ce cas-ci, la valeur de  $M'$  est de  $-4 \times 10^{-6}$ , alors le diamagnétisme n'est donc pas parfait. Cependant, une transition est tout de même visible démontrant ainsi la présence de supraconductivité. Comme observé à la section 4.1.3, les grains dans la couche d'étain sont grossiers. Il est donc possible que les grains d'étain deviennent supraconducteurs, mais pas les joints entre ces derniers.

Une mesure de résistivité a été faite sur un deuxième échantillon plaqué à l'aide de la solution commerciale dont le pH est d'environ 1. Les résultats de cette mesure sont présentés à la figure 5.5.

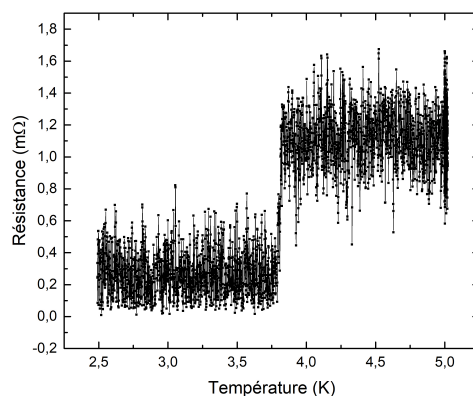


Figure 5.5 Mesure de résistivité électrique à quatre pointes.

Tout comme le premier échantillon, la mesure a été faite à l'aide d'un détecteur synchrone. Une transition dans la résistance est visible à 3.8 K. La mesure est très bruyante puisque la tension lue était très faible, soit de l'ordre de 10  $\mu$ V. Les points s'approchent d'une résistance nulle, sans toutefois atteindre l'absence de résistance, ce qui indique que l'échantillon devient partiellement supraconducteur. Il existe des îlots supraconducteurs sans avoir de chemin électrique entièrement supraconducteur.

Afin de s'assurer de la qualité de l'étain plaqué sur les résonateurs, un substrat sans vias a aussi été plaqué. Il servira à s'assurer que l'étain est toujours au moins partiellement supraconducteur. Le résultat est présenté à la figure 5.6.

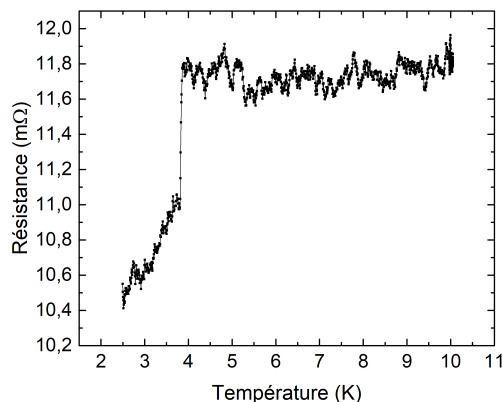


Figure 5.6 Mesure de résistivité électrique à quatre pointes.

Contrairement aux autres mesures, celle-ci est faite à l'aide d'un SMU. Un préamplificateur a aussi été utilisé afin de réduire le bruit sur la mesure. Une transition est encore visible à 3.8 K, ce qui confirme les résultats de la mesure précédente. Encore une fois, la résistance n'est pas nulle sous la transition, l'échantillon contient encore des zones résistives.

Dans le résonateur, l'onde se propage dans le métal, il n'est donc pas optimal d'avoir de la résistance entre les grains. Selon l'équation 2.11, le facteur de qualité est inversement proportionnel à la résistance. Ainsi, même si la transition n'est pas parfaite, elle devrait se

répercuter sur le facteur de qualité. La solution de placage avec un pH de 1 a finalement été choisie, car la transition était plus importante que celle obtenue dans l'étain plaqué

cuivre. Une caractérisation en fréquence d'un résonateur en cuivre a été faite. Cette mesure sert à valider la fonction des résonateurs. Pour cette mesure, c'est le montage présenté à la

section 4.3 qui est utilisé. À la figure 5.7 sont présentées les courbes obtenues. Les courbes présentées à la figure 5.7a correspondent à la caractérisation de la ligne à transmission. Cette mesure est faite pour s'assurer qu'il n'y a pas de pic de résonance à la fréquence voulue qui pourrait être dû aux dimensions du dispositif. En regardant les paramètres  $S_{21}$  ainsi que  $S_{12}$ , soit les paramètres de transmission, il est clair qu'il n'y a pas de résonance dans les alentours de 10 GHz. De plus, la transmission est bonne. En effet, le niveau de transmission se trouve à -2 dB sur la plage de fréquence observée, ce qui veut dire qu'il y a des pertes d'insertion sinon la transmission sera plus près de 0 dB. Puisque les pertes sont monotones, elles sont fort probablement causées par le montage. La mesure étant faite dans une fixture amovible, le contact n'est pas aussi bon que si l'échantillon était soudé. Il est fort probable qu'une partie du signal ne pénètre pas dans l'échantillon. Par contre, le signal se transmet mieux que dans le résonateur qui coupe la transmission en dehors de la fréquence de résonance (voir figure 5.7c). À la figure 5.7b sont présentés les paramètres de transmission et de réflexion pour le résonateur. Celui-ci coupe bien le signal sous et au-dessus de la fréquence de résonance tout en laissant passer le signal à cette fréquence. Un pic de résonance est visible vers 10.2 GHz. La valeur théorique est de 10 GHz. Par

contre, pour les résonateurs, le signal réfléchi est très important.

Une mesure sur une gamme plus étroite centrée autour de la fréquence de résonance permet de mesurer un facteur de qualité de 291 ( $Q = f_c/\Delta f$ ). On voit également sur la figure 5.8 une baisse dans les paramètres de réflexion. Cette baisse est expliquée par le fait qu'une plus grande partie du signal passe par l'échantillon et donc que la portion réfléchiée est plus petite.

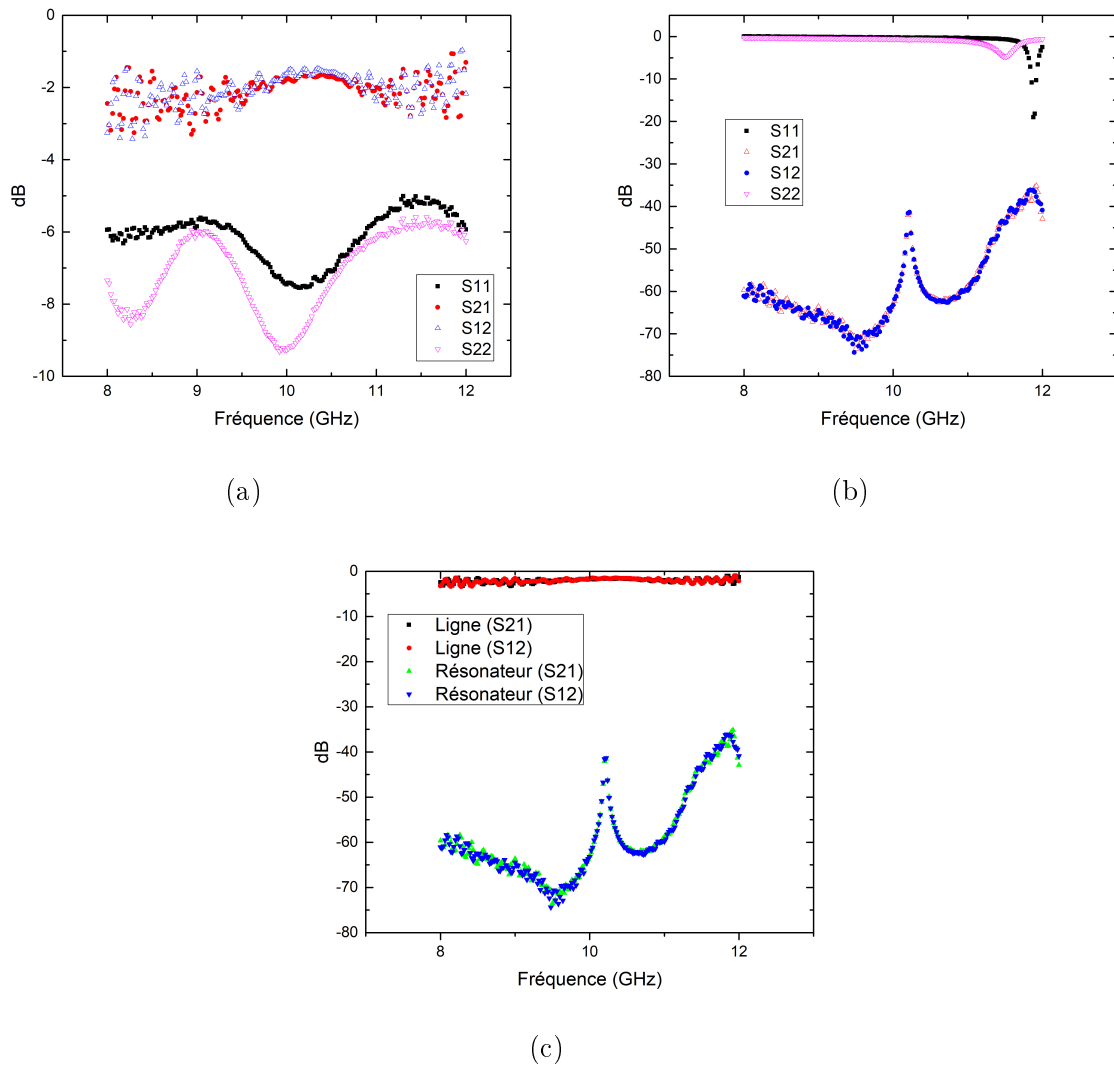


Figure 5.7 (a) Caractérisation de la ligne à transmission. (b) Caractérisation du résonateur. (c) Comparaison de la transmission entre la ligne à transmission et le résonateur.

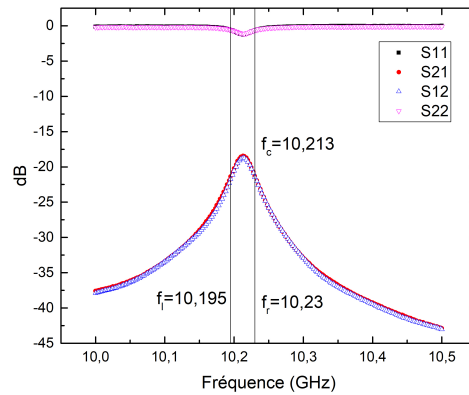


Figure 5.8 Grossissement de la zone d'intérêt du résonateur.

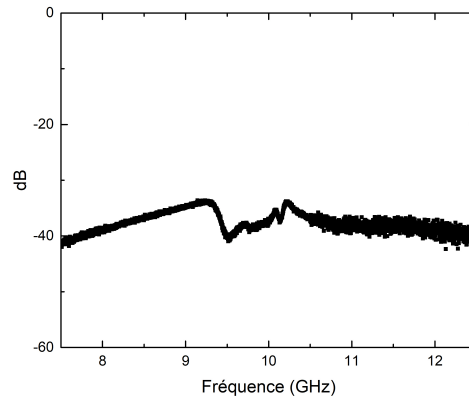
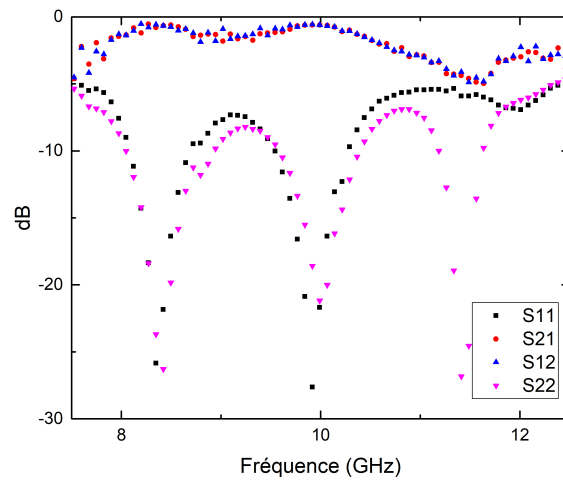


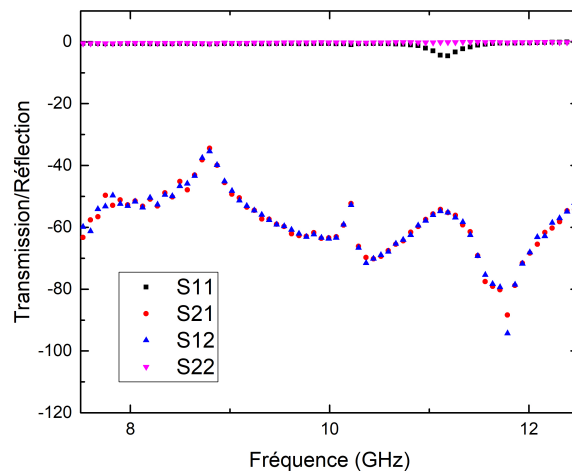
Figure 5.9 Mesure de transmission faite dans le boîtier vide.

À la section 4.4, il est mentionné qu'un porte-échantillon sera utilisé pour les mesures à froid. Afin de s'assurer qu'il fonctionne bien pour ce type de dispositif, il sera aussi testé à température ambiante avec un résonateur de cuivre. Ces résultats sont présentés à la figure 5.10. La ligne à transmission dans la boîte (figure 5.10a) se comporte comme pour ligne à transmission dans la fixture (figure 5.7a). Dans les deux cas, le niveau de transmission est d'environ -5dB (5.12a). Pour ce qui est du signal réfléchi, il est semblable dans les deux cas (figure 5.12b). Pour le résonateur (figure 5.10b), les résultats ne sont pas satisfaisants. Un pic de résonance semble apparaître vers 9 GHz alors que le pic de résonance à 10.2 GHz est partiellement noyé dans le bruit. Le pic qui se trouve à 9 GHz provient du boîtier. En effet, selon la figure 5.9, lors de la caractérisation à vide du boîtier, une résonance apparaît vers 9 GHz. À la figure 5.11 est présenté un grossissement du pic de résonance. Il est moins bien défini que dans la fixture (figure 5.8), le pic semble coupé. Le facteur

de qualité est de 319, ce qui est légèrement plus haut que dans la fixture. Par contre, la baisse des paramètres de réflexion n'est pas présente à la fréquence de résonance. Cette baisse n'est pas visible puisque le signal transmis est très faible. En effet, le signal est de  $-50$  dB. Seulement 0.001% du signal est donc transmis. Pour atteindre le résonateur dans le boîtier, le signal doit passer par plus d'intermédiaires que lors de la mesure dans la fixture. Ainsi, les pertes résistives sont plus élevées, ce qui explique pourquoi le signal transmis est si faible.



(a)



(b)

Figure 5.10 Caractérisation à température ambiante dans le porte-échantillon (a) de la ligne à transmission (b) du résonateur en cuivre.

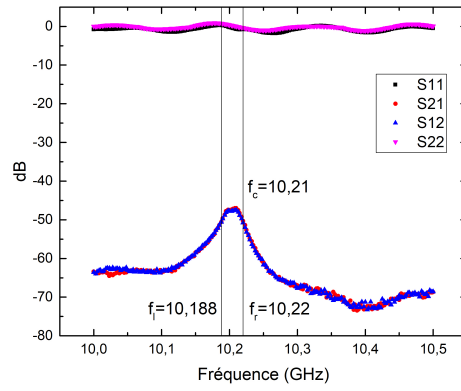
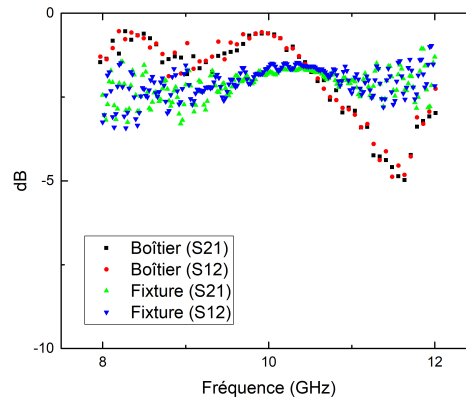
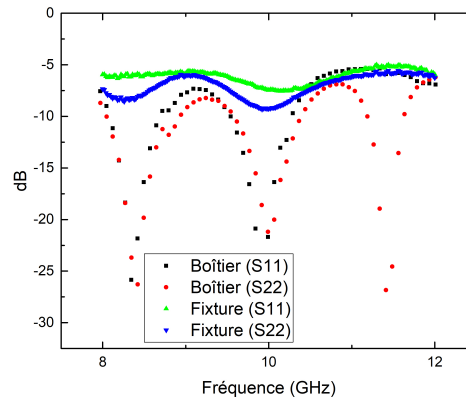


Figure 5.11 Caractérisation dans la zone d'intérêt du résonateur à température ambiante dans le porte-échantillon.



(a)

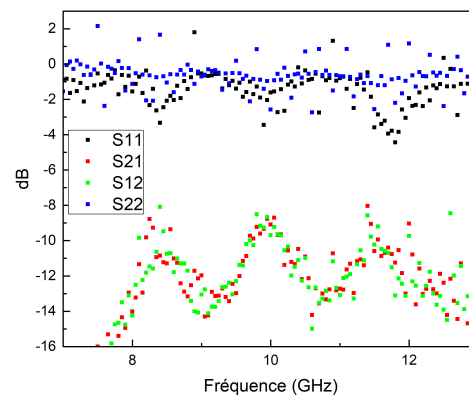


(b)

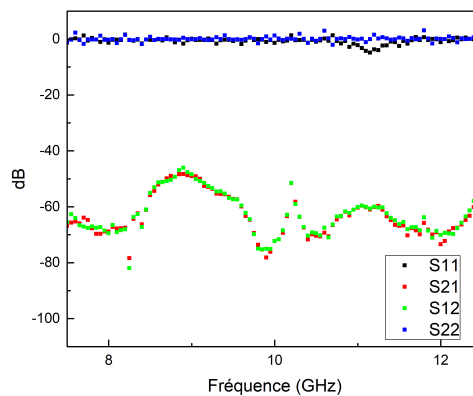
Figure 5.12 Comparaison des signaux transmis (a) et réfléchis (b) pour la ligne à transmission dans le boîtier et dans la fixture.



Afin de couper les fréquences parasites du boîtier, la même mesure a été refaite, mais cette fois, en ajoutant une croix en laiton dans le porte-échantillon. La croix est déposée sur l'échantillon de manière à couper la cavité en quatre sections. Ainsi, les modes naturels de la boîte sont déplacés puisque les dimensions de la boîte changent. Les résultats de l'ajout de cette croix sont présentés à la figure 5.13. Pour ce qui est de la ligne à transmission, cela réduit et fait même disparaître les structures parasites. De plus, les baisses de transmission sont beaucoup moins importantes avec la croix que sans cette dernière. Pour le résonateur, le pic de résonance du boîtier à 9 GHz a perdu sa forme de pic, mais il reste tout de même une augmentation de transmission dans cette région de fréquence. Pour ce qui est du pic à la fréquence de résonance, il est mieux défini et a une plus belle forme. Par contre, le niveau de transmission à la résonance est toujours faible à environ  $-50$  dB.



(a)



(b)

Figure 5.13 Caractérisation de la ligne à transmission (a) et du résonateur (b) en cuivre à température ambiante dans le porte-échantillon avec la croix.

### 5.2.2 Caractérisation en fréquence à température ambiante de l'étain

Trois substrats, avec trois résonateurs par substrat, ont été fabriqués simultanément. Une première caractérisation est faite à température ambiante afin d'éliminer les échantillons non fonctionnels. Pour ce faire, des mesures fréquentielles à température ambiante sont faites sur les neuf échantillons d'étain. Ces mesures sont d'abord effectuées à l'aide de la fixture Anritsu. À la figure 5.14 sont présentés les résultats de l'échantillon N168C 2. La ligne de transmission possède plusieurs structures. Tout comme pour l'échantillon de cuivre, il y a trois anti-résonances dans la plage de fréquence observée. Par contre, dans ce cas-ci, la résonance dans la transmission dans les environs de 10 GHz est beaucoup plus importante que les autres. De plus, la réflexion est moins bonne que pour la ligne à transmission en cuivre. Cela indique que les pertes d'insertion sont très grandes. Le résonateur, présenté à la figure 5.14b, montre un pic de résonance à 10.1 GHz. Ce pic est très bien défini et la transmission est peu bruyante dans les environs. Par contre, il n'y a que très peu de puissance qui est transmise, elle est en majorité réfléchi. C'est pourquoi il ne semble pas y avoir de baisse de la réflexion à la fréquence de résonance.

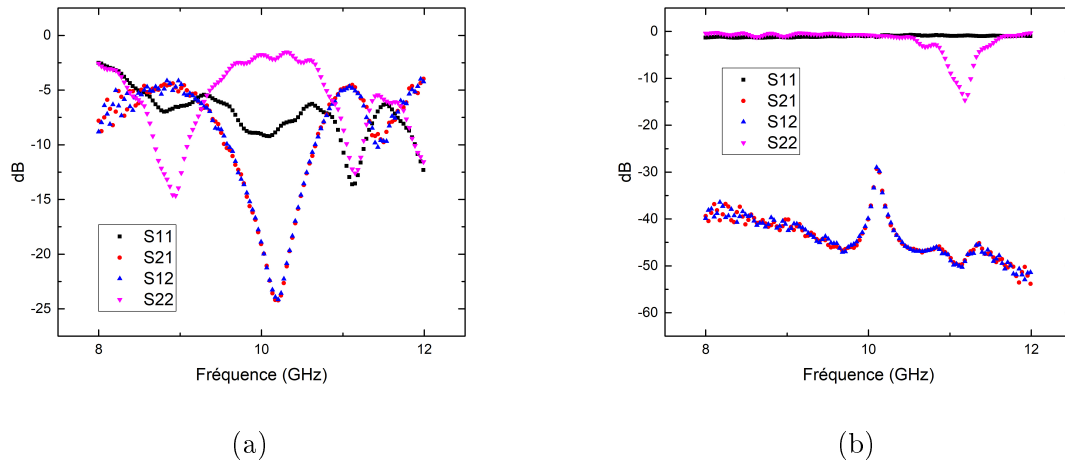
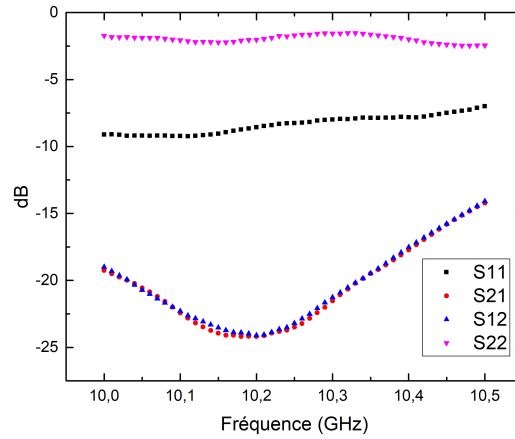


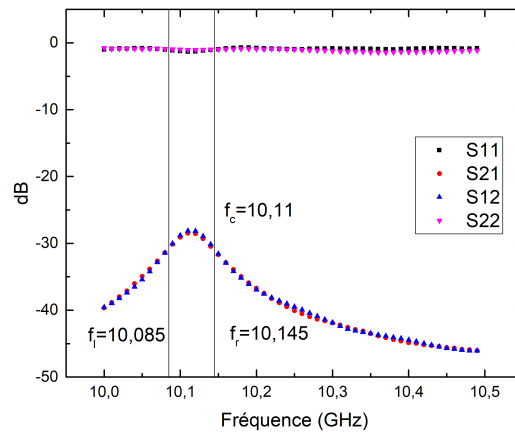
Figure 5.14 Caractérisation de la ligne à transmission (a) et du résonateur (b) en étain à température ambiante dans la fixture Anritsu.

Dans la zone d'intérêt, la ligne à transmission (figure 5.15a) présente des paramètres de réflexion stable. Par contre, il y a un décalage entre  $S_{11}$  et  $S_{22}$  qui pourrait être expliqué par un contact de moins bonne qualité et donc une plus grande perte du côté de  $S_{22}$ . De plus, la transmission n'est pas très bonne dans cette plage de fréquence car il y a beaucoup plus de réflexion que de transmission. À la figure 5.15b est présenté un grossissement de

la zone d'intérêt du résonateur. Le facteur de qualité calculé est de 168. Encore une fois, la transmission est très faible par rapport à la réflexion, il n'y a donc pas de changement visible dans la réflexion à la fréquence de résonance.



(a)



(b)

Figure 5.15 Grossissement des zones d'intérêts de la ligne à transmission (a) et du résonateur (b) en étain à température ambiante.

Dans le tableau 5.1 sont présentées les valeurs du facteur de qualité ( $Q$ ) et les fréquences de résonance trouvées pour les différents résonateurs en étain à température ambiante. N168A, N168B et N168C correspondent aux tranches de silicium hautes résistivités utilisées lors de la fabrication. L'indication 1 correspond aux résonateurs dont les diaphragmes font 200  $\mu\text{m}$ , le 2 à ceux dont les diaphragmes font 400  $\mu\text{m}$  et le 3 à ceux de 700  $\mu\text{m}$ .

Échantillon		Largeur du diaphragme	Q	$f_0$ (GHz)
N168A	1	200 $\mu\text{m}$	92.36	10.16
	2	400 $\mu\text{m}$	-	-
	3	700 $\mu\text{m}$	90.72	9.98
N168B	1	200 $\mu\text{m}$	184.72	10.16
	2	400 $\mu\text{m}$	-	-
	3	700 $\mu\text{m}$	-	-
N168C	1	200 $\mu\text{m}$	126.75	10.14
	2	400 $\mu\text{m}$	168.5	10.11
	3	700 $\mu\text{m}$	38.24	9.456

Tableau 5.1 Facteur de qualité et fréquence de résonance pour les résonateurs en étain. Mesure faite à l'aide de la fixture

Les échantillons, N168A 2, N168B 2 et 3 ainsi que N168C 3 sont écartés du lot en raison soit de l'absence de pic de résonance ou d'un facteur de qualité trop faible. Lors des tests de soudure à l'indium dans le porte-échantillon, l'échantillon N168A 1 a été endommagé au point qu'il est impossible de refaire une mesure. Il est donc aussi écarté.

Avant de refroidir un échantillon, il est important de faire une caractérisation à température ambiante pour s'assurer que l'assemblage de l'échantillon dans le montage est bon, particulièrement pour ce qui est des contacts. En effet, le collage à la laque est fragile et on doit s'assurer que le contact est bien fait. L'observation au microscope du porte-échantillon a montré qu'il y avait un court-circuit entre la tige du SMA et le boîtier. Ce bris implique qu'il ne sera pas possible de caractériser une ligne à transmission et un résonateur en même temps. C'est pourquoi seulement le résonateur sera caractérisé pour la suite des expériences. Les résultats de cette caractérisation sont présentés à la figure 5.16.

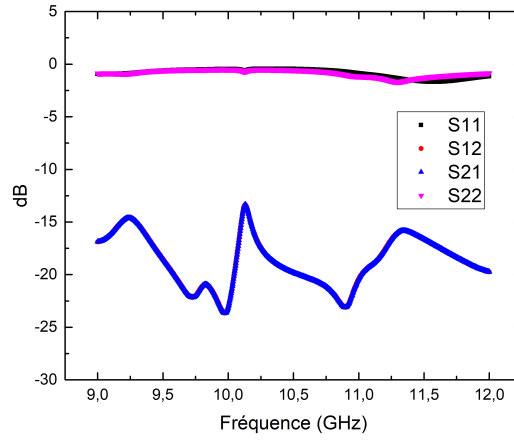


Figure 5.16 Caractérisation du résonateur en étain à température ambiante dans le porte-échantillon.

Il y a dans le porte-échantillon plus de structures que dans la fixture Anritsu. De plus, le pic de résonance est bien visible, mais asymétrique. La transmission à la fréquence de résonance est d'environ  $-12$  dB alors qu'elle était de  $-30$  dB dans la fixture, ce qui indique que le contact est meilleur dans le porte-échantillon que dans la fixture. Il y a une très faible baisse dans la réflexion dans la zone d'intérêt présentée à la figure 5.17. Toujours à l'aide de la même figure, le facteur de qualité calculé est de 83.04 pour ce résonateur dans le porte-échantillon. Le facteur de qualité a diminué de moitié par rapport à la mesure dans la fixture. Cette diminution peut être attribuée au fait qu'il y a superposition des structures dans la transmission. Il est possible de voir que le pic de résonance est partiellement coupé sur la gauche par l'anti-résonance. Le facteur de qualité serait donc surestimé.

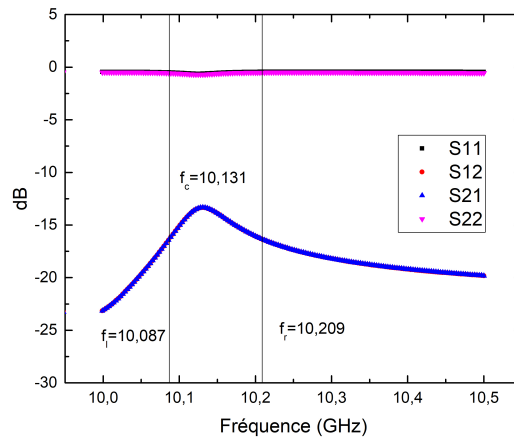
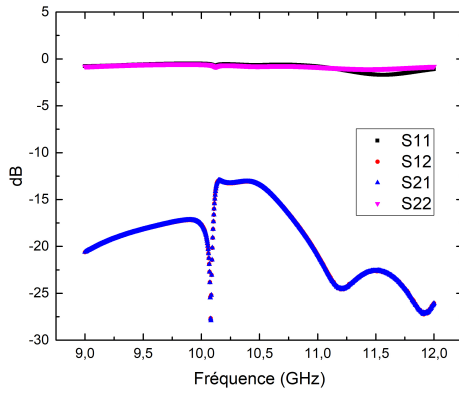
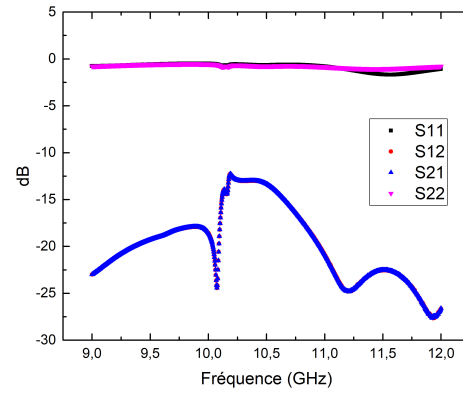


Figure 5.17 Grossissement de la zone d'intérêt du résonateur.

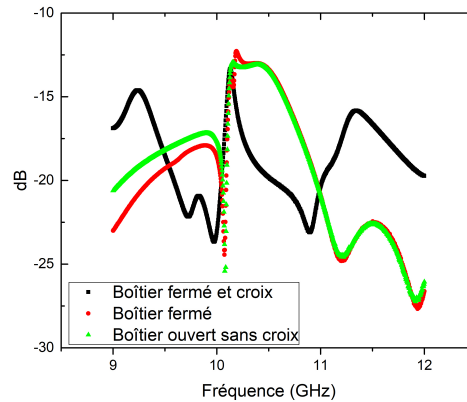
Toutes les mesures sur les résonateurs en étain dans le porte-échantillon ont été faites avec la croix afin de voir l'effet de cette dernière sur les échantillons. Des mesures sont faites sans celle-ci et sans le couvercle du porte-échantillon. En regardant les graphiques de la figure 5.18, le pic de résonance disparaît si la croix n'est pas présente. En plus, une anti-résonance apparaît dans les environs de 10 GHz. Il est donc très important que cette dernière soit présente lors des mesures. La croix a comme effet de diviser les dimensions du porte-échantillon par deux dans les deux axes. Les modes parasites du boîtier sont alors déplacés vers des fréquences plus hautes, ce qui permet d'avoir une mesure plus nette. En comparant les figures 5.18a et 5.18b, on observe un début de pic de résonance lorsque le couvercle est en place alors que ce n'est pas le cas lorsqu'il n'y est pas. Celui-ci joue donc un rôle dans la réduction des pertes par radiation.



(a)



(b)



(c)

Figure 5.18 Caractérisation du résonateur selon différentes configurations du porte-échantillon. (a) Sans la croix ni le couvercle. (b) Sans la croix. (c) Comparaison entre les différentes configurations

### 5.2.3 Caractérisation en fréquence du résonateur supraconducteur

#### Caractérisation à 1.6 K

Pour commencer les mesures fréquentielles à froid, l'échantillon N168A 3 a été refroidi dans le VTI. Les courbes obtenues sont présentées à la figure 5.19.

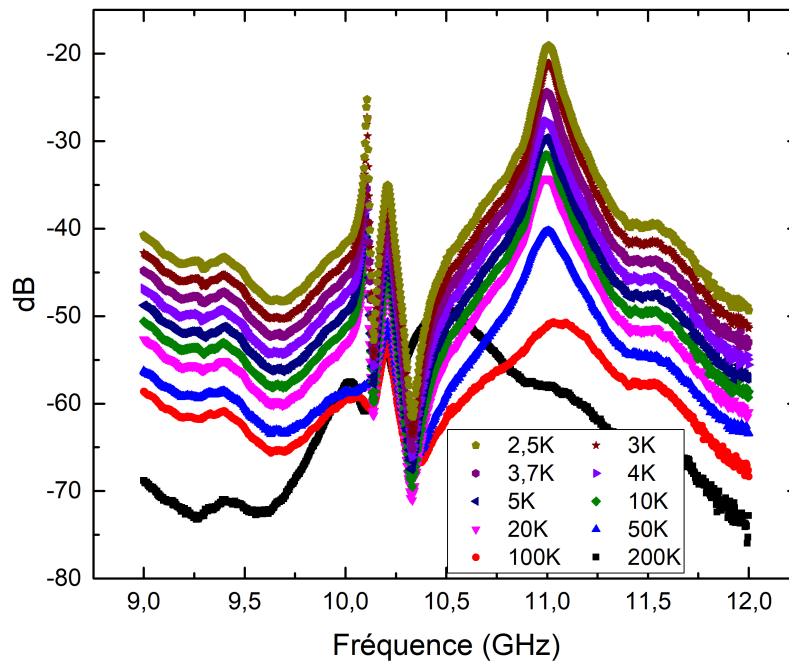


Figure 5.19 Première caractérisation à froid d'un résonateur (N168A 3). Le graphique présente la transmission en fréquence selon la température. Les courbes ont été décalées de 2dB pour la lisibilité.

La figure 5.19 montre le déplacement de la fréquence de résonance de 9.98 GHz à 11 GHz. Il semble avoir présence d'une autre résonance à 10.2 GHz. Toutefois, le facteur de qualité n'a pas le comportement attendu et n'est pas le même que celui observé pour les autres échantillons présentés à la suite. À 10.3 GHz se trouve une anti-résonance. Puisque le signal est très faible, une très petite fuite sera importante. Une anti-résonance peut montrer qu'il existe une fuite à cette fréquence. Le facteur de qualité a été calculé pour le pic de résonance se déplaçant de 9.98 GHz à 11 GHz et est présenté à la figure 5.20.

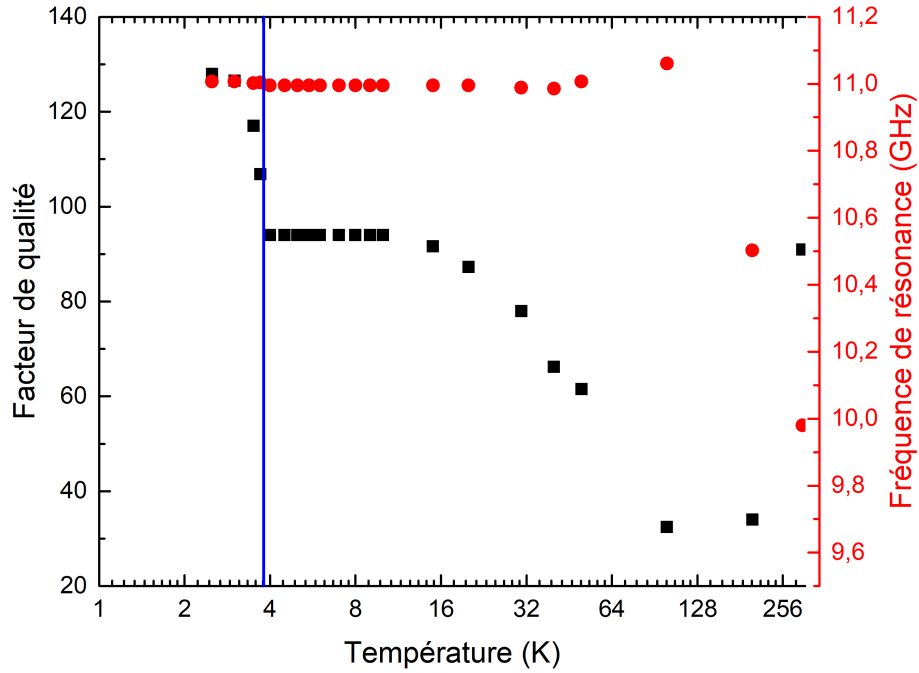
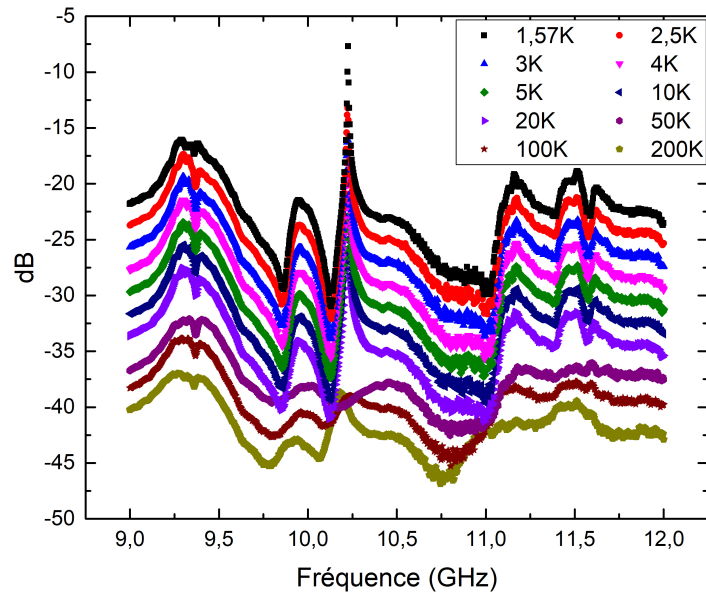


Figure 5.20 Dépendance en température du facteur de qualité pour l'échantillon N168A 3.

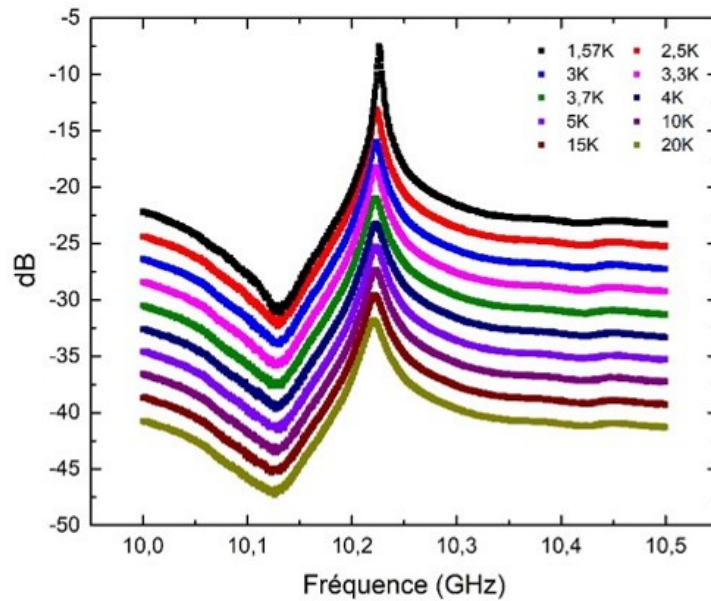
À la figure précédente, le point à température ambiante correspond à celui pris dans la fixture. En commençant le refroidissement, on observe premièrement que la valeur du facteur de qualité semble grandement diminuer en soudant le résonateur dans le porte-échantillon. De plus, l'augmentation de  $Q$  n'est pas très grande en refroidissant. Une saturation est présente à partir de 10 K. Cette saturation survient lorsque la résistance se stabilise avant d'arriver à la température de transition. Lorsque l'échantillon devient supraconducteur, sous 3.7 K, le facteur de qualité reprend sa croissance.

Afin de confirmer que les bons résultats ont été observés, un deuxième échantillon, N168C 2, a été refroidi encore une fois dans le VTI. Les résultats sont présentés à la figure 5.21.





(a)



(b)

Figure 5.21 (a) Caractérisation du résonateur N168C 2 en température. (b) Agrandissement sur la zone d'intérêt. Les courbes ont été décalées de 2dB pour la lisibilité.

La comparaison entre les figures 5.19 et 5.21a montre que les structures présentes ne sont pas les mêmes pour les deux échantillons. De plus, la fréquence de résonance n'est pas la même. À température ambiante, la fréquence de résonance de l'échantillon N168C 2 était

de 10.11 GHz et à basse température, elle est passée un peu au-dessus de 10.2 GHz tel qu'il est possible de voir sur la figure 5.21b. Le facteur de qualité est ensuite extrait et présenté à la figure 5.22.

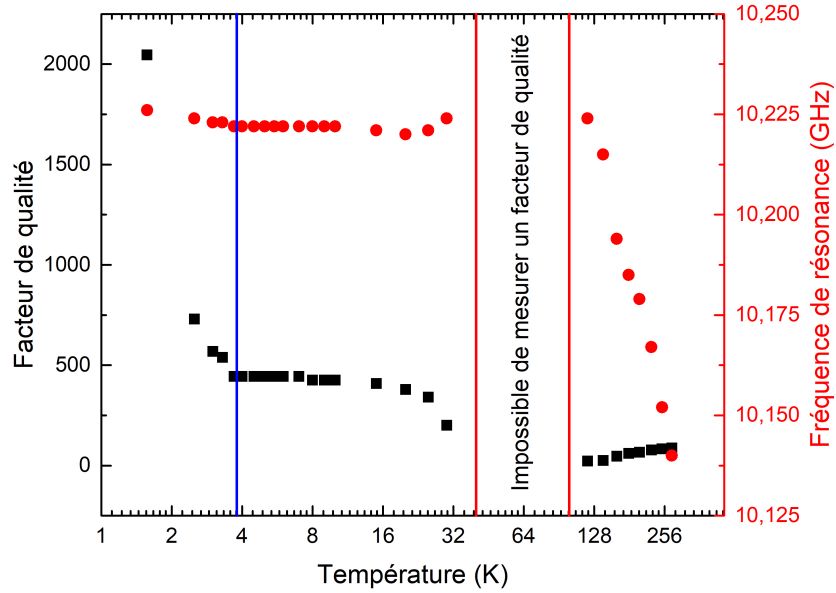
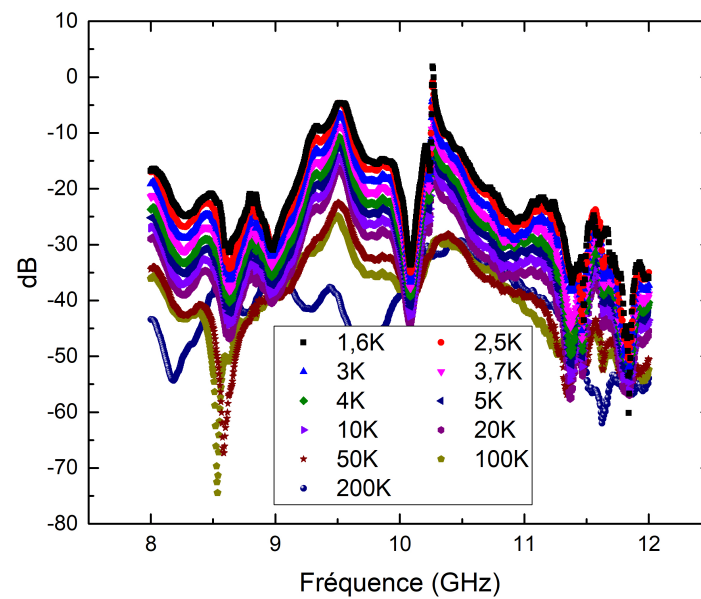


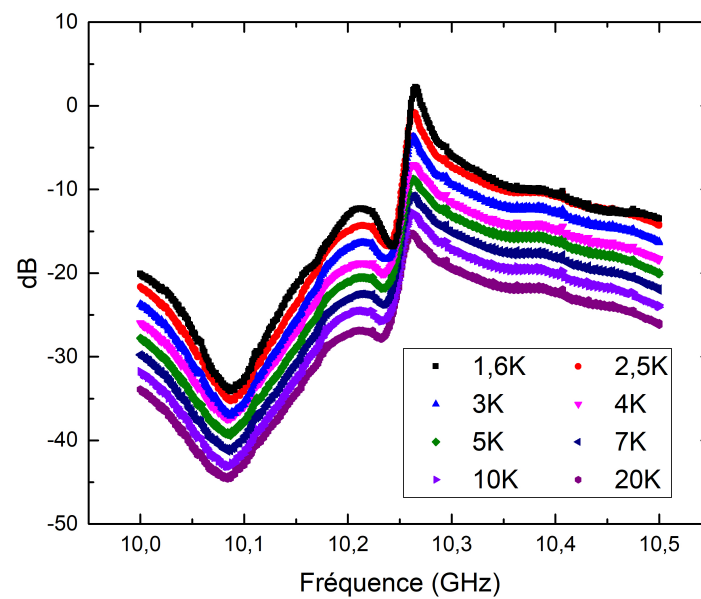
Figure 5.22 Dépendance en température du facteur de qualité pour l'échantillon N168C 2.

Tout comme le résonateur précédent, le facteur de qualité sature sous 10 K, puis reprend sa croissance sous la température de transition. Par contre, le facteur de qualité passe d'environ 200 à température ambiante à 480 à 4 K et à plus de 2000 à 1.5 K.

Dans le but de confirmer les résultats obtenus précédemment, un troisième résonateur a été refroidi. Les résultats obtenus pour l'échantillon N168B 1 sont présentés à la figure 5.23. Cet échantillon présente plus de structures que les autres, mais il semble y avoir une résonance près de 10.25 GHz (figure 5.23b). Cet échantillon ressemble donc plus à l'échantillon N168C 2 si l'on compare l'impact de la température sur la fréquence de résonance et le facteur de qualité.



(a)



(b)

Figure 5.23 (a) Caractérisation du résonateur N168B 1 en température. (b) Agrandissement de la zone d'intérêt du résonateur. Les courbes ont été décalées de 2dB pour la lisibilité.

Comme pour les deux autres échantillons, le facteur de qualité a été extrait et est présenté à la figure 5.24. Les résultats sont encore une fois plus semblables à l'échantillon N168C 2 sauf que l'augmentation du facteur de qualité est moins importante. Les résultats du résonateur N168A 3 ne suivent pas les résultats attendus et ne sont pas en accord avec ceux des deux autres résonateurs testés. Cela peut provenir du résonateur en lui-même ou d'un problème lié à l'assemblage. Il y a de fortes chances que les résultats présentés proviennent d'une résonance parasite qui a vu son facteur de qualité s'améliorer par la baisse de la résistance sans que cela soit la structure conçue.

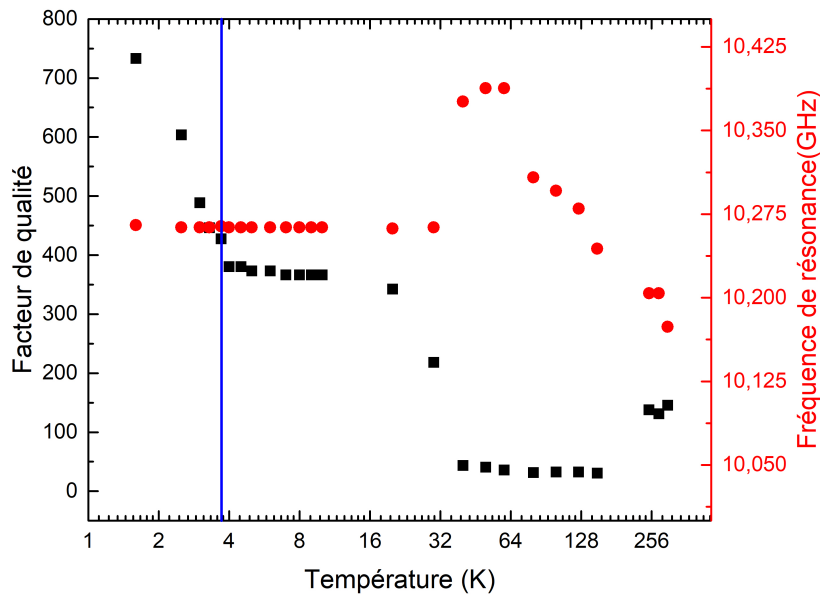


Figure 5.24 Dépendance en température du facteur de qualité pour l'échantillon N168B 1.

### Caractérisation à 25 mK

Sur les figures 5.22 et 5.24, on remarque que le facteur de qualité ne sature pas sous la température de transition. Pour cette raison, d'autres mesures ont été effectuées sur ces échantillons à plus basse température. De plus, en informatique quantique, les systèmes sont opérés à environ 50 mK. Toujours à l'aide du même porte-échantillon, les mêmes mesures ont été effectuées dans un réfrigérateur à dilution BlueFors. Le premier échantillon qui a été caractérisé à cette température est le N168B 1. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 5.25. Les courbes sont très semblables à celles obtenues dans le VTI. La fréquence de résonance se trouve toujours près de 10.28 GHz. L'anti-résonance se trouvant tout juste en-dessous de 10.28 GHz semble être moins importante.

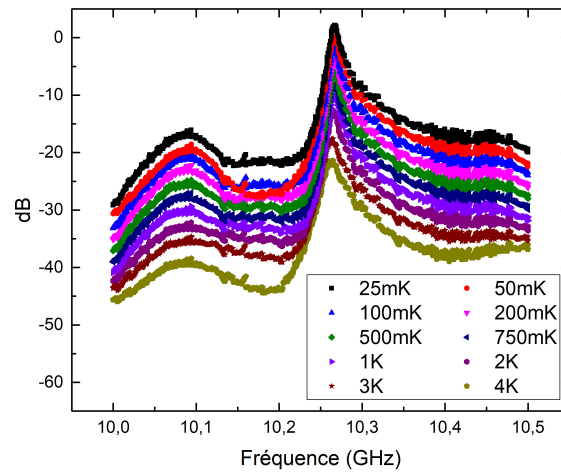


Figure 5.25 Caractérisation à plus basse température de l'échantillon N168B  
1. Les courbes ont été décalées de 2dB pour la lisibilité.

Il est possible à partir de ces courbes d'extraire le facteur de qualité du résonateur à différentes températures. Les résultats se trouvent à la figure 5.26.

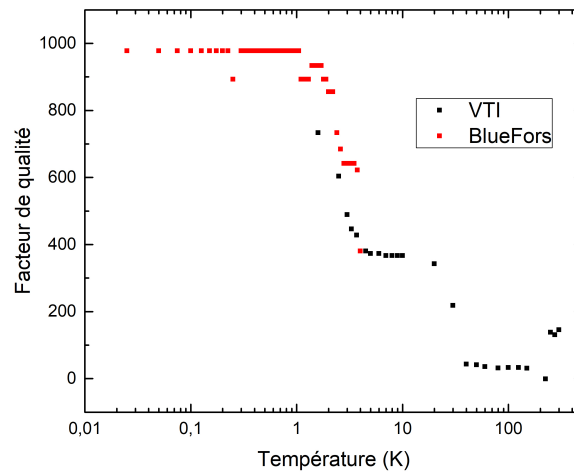


Figure 5.26 Dépendance en température du facteur de qualité pour l'échantillon N168B 1.

Les points en rouge représentent les données prises dans le réfrigérateur à dilution, alors que les données en noires sont celles prises dans le VTI. Les points se recoupent assez bien pour les températures qui ont pu être mesurées dans les deux systèmes. Le facteur

de qualité sature vers 1 K puis devient très stable. Cette stabilité est probablement plus importante qu'elle devrait l'être. En effet, les valeurs de facteur de qualité ont été extraites à la main. De plus, la marche des points en fréquence était peut-être un peu trop grande. Même si la puissance envoyée dans le dispositif était faible, il est possible qu'elle réchauffe l'échantillon. Ce qui voudrait dire que tous les points sous 1 K ne soient pas à la température indiquée.

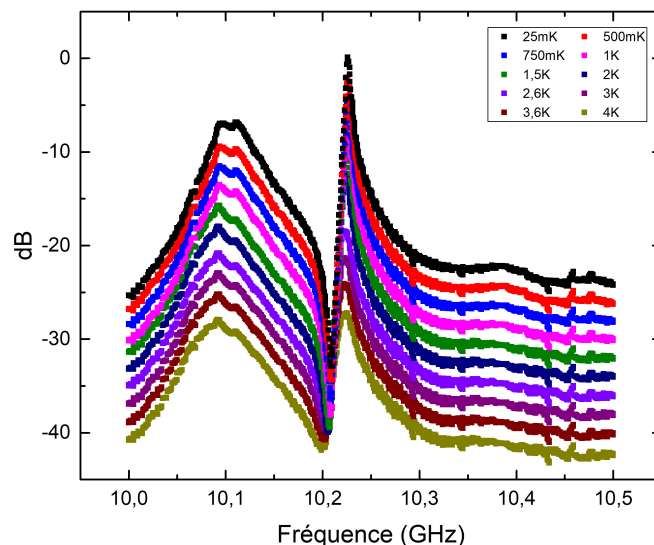


Figure 5.27 Caractérisation à plus basse température de l'échantillon N168C 2. Les courbes ont été décalées de 2dB pour la lisibilité.

Afin de confirmer ces résultats, l'échantillon N168C 2 a aussi été refroidi. Les courbes obtenues sont présentées à la figure 5.27. Une anti-résonance est apparue à 10.2 GHz ainsi qu'une résonance vers 10.1 GHz. Toutefois, la résonance à 10.25 GHz est toujours présente. Contrairement à l'autre échantillon, celui-ci a été enlevé puis remis dans le porte-échantillon. Puisque la laque d'argent ne permet pas un procédé facilement reproductible, il est possible que les différences puissent être expliquées par cette manipulation. Comme pour les autres courbes, le facteur de qualité a été extrait. Comme il est possible de le voir à la figure 5.28, les résultats entre les deux méthodes de refroidissement apportent les mêmes résultats. De plus, la saturation du facteur de qualité se fait encore une fois vers 1 K. Les deux échantillons ont donc un comportement semblable, la saturation a donc la même explication que pour l'autre échantillon. Seule la valeur du facteur de qualité diffère. Cette variation peut être causée par la fabrication. En effet, si la couche d'étain n'est pas

uniforme dans les vias et les diaphragmes d'entrées et de sorties du résonateur, il y aura des pertes à ces endroits. Ainsi, plus il y a de pertes et plus le facteur de qualité est faible.

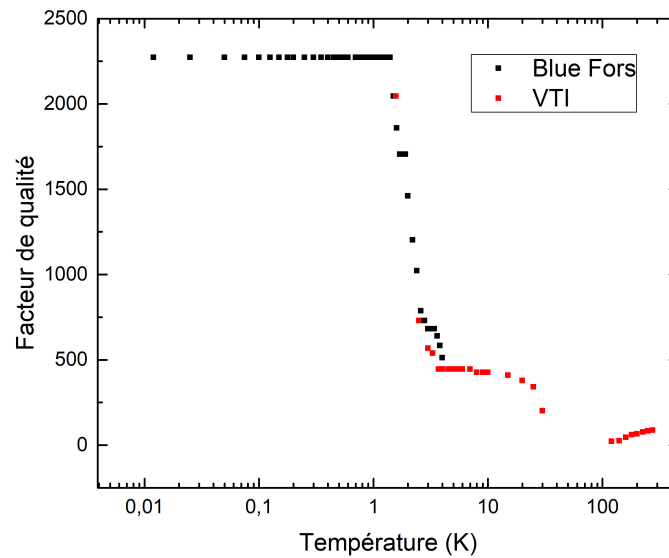


Figure 5.28 Dépendance en température du facteur de qualité pour l'échantillon N168C 2.

### Analyse de la fréquence de résonance

Il a été mentionné à la section 2.3.1 que les dispositifs GIS sont modélisés comme des guides d'ondes rectangulaires. Ainsi, un résonateur GIS possède plusieurs similitudes avec une cavité 3D. La fréquence de résonance de ces cavités dépend des dimensions, ce qui est aussi le cas pour un résonateur GIS. Lors du refroidissement du résonateur, les dimensions varient, ce qui implique aussi une variation de la fréquence de résonance. Selon Swenson [33], le silicium en refroidissant se comporte tel que présenté à la figure 5.29.

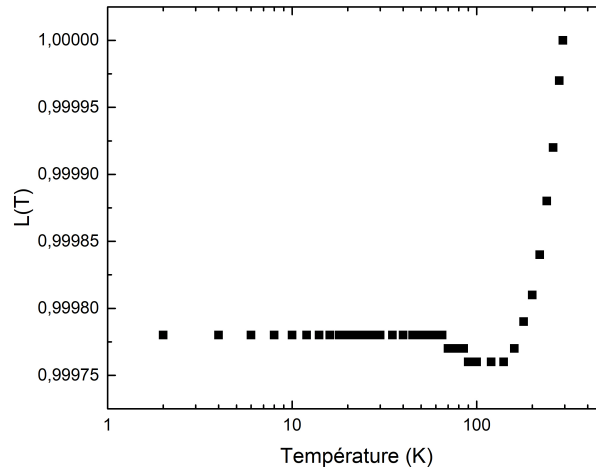


Figure 5.29 Dilatation du silicium en fonction de la température. [33]

Les dimensions du silicium selon la température sont données par

$$L(T) = L_{20} \left( \frac{\Delta L}{L} + 1 \right) \quad (5.1)$$

où  $\Delta L/L$  est le coefficient de variation en température [33].

À titre de rappel, la fréquence de résonance en fonction des dimensions du résonateur est donnée par

$$f = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{c}\right)^2} \quad (5.2)$$

Pour avoir la dépendance de la fréquence de résonance en fonction de la température, il suffit d'insérer 5.1 dans 5.2, ce qui donne

$$f(T) \propto \frac{1}{|\Delta L/L + 1|} \times f \quad (5.3)$$

Il est alors possible de tracer le pré facteur en fonction de la température et de comparer avec les résultats obtenus après normalisation. C'est ce qui est présenté à la figure 5.30.



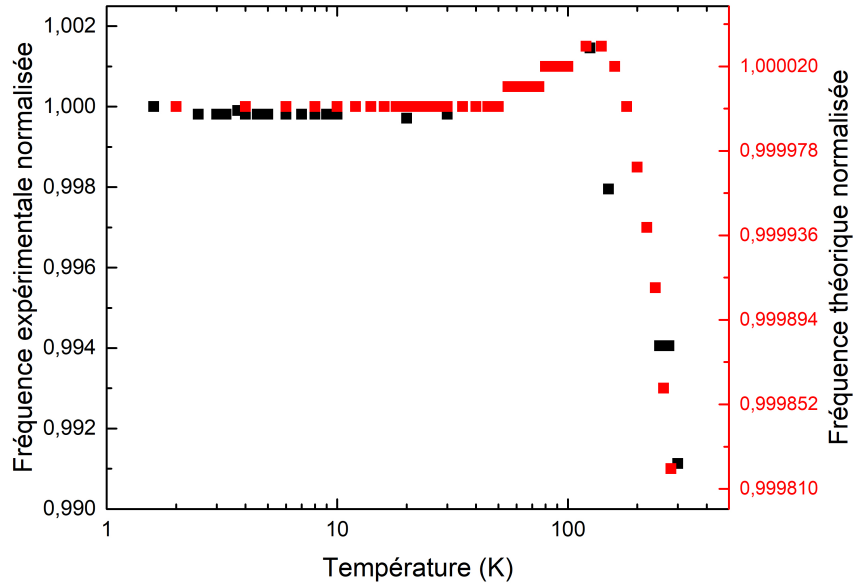


Figure 5.30 Effet théorique de la fréquence de résonance en fonction de la dilatation thermique normalisée et comparaison avec les points expérimentaux.

À première vue, les deux courbes semblent similaires. Par contre, il y a une légère divergence vers 100 K. À cette température, il est plus difficile de trouver la fréquence de résonance des points expérimentaux. Par contre, la variation est beaucoup plus grande pour les points expérimentaux que ceux théoriques. Il y aurait donc une composante autre que la dilatation thermique qui explique le changement de la fréquence de résonance avec la température. En regardant l'équation 5.2 [10], il ne reste que deux coefficients dont la dépendance en température n'a pas été étudiée, soit  $\mu$  et  $\epsilon$ . Par contre,  $\mu$  ne dépend pas de la température, il est donc inutile de l'étudier. Selon Djerfi et al. [17], la permittivité change selon la température. Cette dépendance est présentée à la figure 5.31. Il est possible d'extraire l'équation de dépendance en température de la permittivité.

$$\epsilon(T) = 11.447 + 1.264 \times 10^{-4}T + 1.938 \times 10^{-6}T^2 \quad (5.4)$$

En insérant les équations 5.4 et 5.1 dans 5.2, on obtient

$$f(T) = \frac{1}{11.447 + 1.264 \times 10^{-4}T + 1.938 \times 10^{-6}T^2} \frac{1}{|\Delta L/L + 1|} \times f \quad (5.5)$$

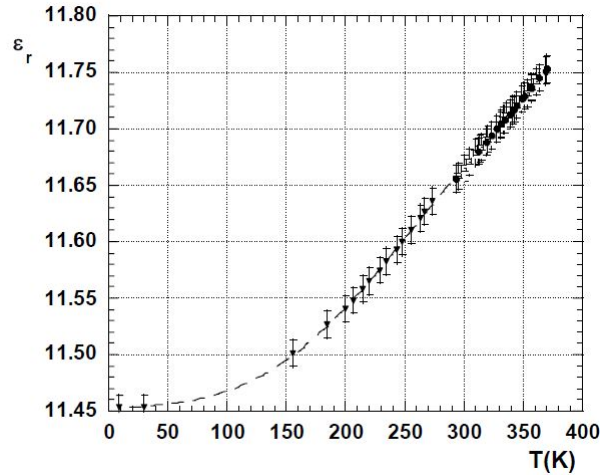


Figure 5.31 Permittivité du silicium en fonction de la température [22].

Ainsi, il est possible de tracer l'impact du changement de température sur la fréquence de résonance en prenant en compte les variations de la permittivité ainsi que la dilatation thermique. Cette courbe est présentée à la figure 5.32. Encore une fois, la courbe théorique est comparée aux points expérimentaux et les deux courbes sont normalisées par rapport à leur valeur à très basse température.

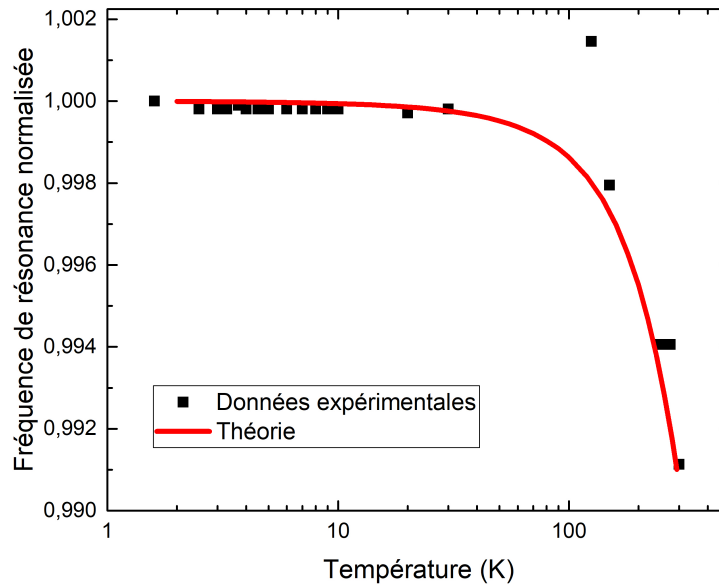


Figure 5.32 Effet théorique de la fréquence de résonance en fonction du changement en température de la permittivité normalisée et comparaison avec les points expérimentaux.

Cette fois-ci, les deux courbes sont sur la même échelle. De plus, la courbe théorique est bien superposée à la courbe expérimentale sauf pour un point. À cette température, il est difficile de bien trouver la fréquence de résonance puisque le pic de résonance est mal défini et que le bruit est très important. Pour rappel, les résonateurs coplanaires présentent un comportement semblable en fonction de la température telle que présenté dans *Metallic coplanar resonators optimized for low temperature measurements* [29]. La fréquence de résonance des résonateurs GIS présente un comportement semblable à celui des résonateurs coplanaires.

À l'annexe B se trouvent toutes les mesures qui n'ont pas été présentées dans cette section.

#### 5.2.4 Calibration

Puisque les mesures sont faites dans un système fermé dont la température est variable, la calibration n'est pas parfaite. Tous les câbles sont faits pour être affectés le moins possible par une variation de température. Par contre, la calibration étant faite à température ambiante et puisque le système est fermé, il n'est pas possible de la faire à toutes les températures voulues. De plus, le module de calibration n'est pas fait pour être mis à très basse température. Ainsi, tous les changements vont influencer les résultats obtenus à basse température. Comme la puissance utilisée est très faible, les effets seront encore plus importants. C'est aussi pourquoi certaines courbes ont des transmissions qui dépassent 0 dB.

---



# CHAPITRE 6

## CONCLUSION

### 6.1 Sommaire

Au tout début de ce projet, des résonateurs GIS en cuivre ont été fabriqués. Le cuivre a été utilisé en premier, même s'il n'est pas supraconducteur, afin de montrer que le procédé de fabrication permettait de fabriquer des résonateurs fonctionnels. En effet, le cuivre est un métal dont le placage est bien connu, il était donc plus facile de l'employer pour fabriquer un prototype. Le placage a été fait en utilisant le NiB comme couche d'accroche. Ce procédé devait aussi servir pour le placage des résonateurs en étain qui était le métal supraconducteur choisi. Par contre, le NiB a été gravé par l'acide, c'est pourquoi la solution de placage de cuivre utilisée avait un pH de 7 alors que la solution pour le placage d'étain a un pH de 1. Des modifications ont été faites à la solution de placage d'étain afin d'augmenter son pH jusqu'à 5.7. Par contre, l'étain obtenu n'était pas parfait puisqu'il n'a pas été possible de trouver de la supraconductivité suite à la première mesure quatre pointes. Une mesure de susceptibilité magnétique a tout de même permis de montrer qu'il y avait bien une transition supraconductrice à 3.8 K. C'est pourquoi la couche d'accroche a été changée pour de l'or évaporé. Il a alors été possible de plaquer de l'étain à l'aide de la solution à pH 1. La mesure à quatre pointes de cet échantillon a permis de montrer qu'il y avait une transition supraconductrice à la température attendue. Par contre, la transition n'était pas parfaite, la résistance n'est pas devenue pas nulle, ce qui indiquait que l'étain ne possédait pas de chemin électrique entièrement supraconducteur, qu'il restait des endroits résistifs. Le projet s'est tout de même poursuivi puisqu'il y a une baisse dans la résistivité qui permettait de voir un effet sur le facteur de qualité.

Pour observer le facteur de qualité, des mesures en fréquence ont été faites. Les premières mesures se sont faites à température ambiante pour les échantillons de cuivre et d'étain. Les résonateurs en cuivre avaient un facteur de qualité dans les environs de 300 alors que ceux en étain étaient plus de 200. Ce résultat était attendu puisque le cuivre est un meilleur conducteur que l'étain à température ambiante.

Les résonateurs en étain ont ensuite été refroidis jusqu'à 1.5 K. Cela a permis de montrer que le facteur de qualité augmentait significativement à la température de transition. Celui-ci est passé de 200 à température ambiante à 2000 à basse température. Puisque la transition supraconductrice n'était pas parfaite, le facteur de qualité n'était pas saturé à 1.5 K. C'est pourquoi, une deuxième mesure a été faite jusqu'à 25 K. De plus, les qubits ont une température d'opération d'environ 50 mK. Lors de cette mesure, le facteur de qualité a pu atteindre une valeur de 2250 et une saturation a été observée à partir de 1 K.

Lors de la caractérisation en fréquence, un deuxième paramètre a été étudié, soit la fréquence de résonance. Celle-ci dépend de plusieurs paramètres dont certains varient en fonction de la température, dont les dimensions du résonateur ainsi que la permittivité. En refroidissant l'échantillon, celui-ci a subi de la contraction thermique. Par contre, la contraction thermique n'était pas suffisante pour expliquer la variation de la fréquence de résonance. En effet, la variation de la permittivité est le paramètre ayant le plus d'impact.

## 6.2 Contributions

La technologie GIS est principalement utilisée à température ambiante et est faite de cuivre. Dans le cadre de ce projet, une avenue différente a été explorée. Un dispositif GIS a été fabriqué à l'aide d'étain, un métal supraconducteur. La caractérisation de l'étain a montré que l'étain plaqué possède peu d'impureté puisque la température de transition se trouve à 3.8 K, soit la température attendue. Par contre, le placage forme des grains et l'étain ne devient pas complètement supraconducteur.

L'étude du facteur de qualité a démontré que celui-ci augmente lorsque la température diminue, mais qu'il sature lorsque la résistance sature elle aussi. Par contre, en passant la température de transition, le facteur de qualité augmente grandement, puisque la résistance chute à cette température. Il a aussi été observé que la fréquence de résonance varie avec la température. L'étude de cette variation a permis de montrer que la dilation thermique joue un certain rôle, mais que la plus grande contribution vient du changement de la permittivité en fonction de la température.

Malgré une fabrication imparfaite, les résultats obtenus permettent de montrer que cette technologie pourrait permettre de faire des résonateurs à haut facteur de qualité avec un procédé de fabrication relativement facile et dont le temps de cycle est relativement court.

---

La plupart des étapes de fabrication pourraient aussi être fait en lot dans une industrie du domaine. La seule étape qu'il faudrait modifier est celle du dépôt de la couche d'accroche afin de faire le dépôt de manière liquide.

## 6.3 Travaux futurs

Le procédé de fabrication actuel ne permet pas de faire toute la fabrication en solution aqueuse. Pour être possible, il faudrait trouver une méthode qui déposerait une couche d'accroche qui permettrait d'entreprendre le placage d'étain tout en résistant à la solution de placage. Cette couche d'accroche doit aussi servir de barrière pour contrer la diffusion de l'étain dans le silicium. Ceci aurait aussi comme effet d'uniformiser la couche d'étain dans les vias et les diaphragmes. En effet, puisque le dépôt d'or dans la méthode présentée dans ce document dépend de l'angle de déposition, il est possible que la couche d'or ne soit pas assez épaisse à certains endroits. Si la quantité n'est pas suffisante, l'épaisseur d'étain à ces endroits n'atteindra pas l'épaisseur visée. Il est donc possible que les pertes soient augmentées à ces endroits. Si les pertes augmentent, le facteur de qualité diminue. Un changement de substrat pourrait aussi être tenté afin d'observer l'impact sur le facteur de qualité. Des substrats à base de GaAs et de saphir pourraient être utilisés. Il faudrait pour cela créer un nouveau procédé de fabrication permettant de plaquer un métal supraconducteur sur ces substrats.

Il a été observé lors de la caractérisation qu'une grande partie du signal était réfléchi et non transmise. Une mauvaise adaptation d'impédance peut être une des causes possibles. Pour améliorer cet aspect, il faudrait revoir le design des résonateurs. Il faudrait augmenter la dimension des chemins coplanaire entre l'extrémité de l'échantillon et le diaphragme d'entrée. Le changement serait moins brusque, ce qui faciliterait l'adaptation d'impédance.

Il pourrait aussi être intéressant de coupler un qubit avec un résonateur supraconducteur GIS, c'est-à-dire de faire un pont capacitif entre les deux. Une fois le couplage effectué, il faudrait étudier l'impact du couplage sur le qubit. C'est-à-dire de regarder l'augmentation du temps de cohérence du qubit suite au couplage avec le résonateur.





# ANNEXE A

## PROCÉDÉS

### A.1 Procédé de fabrication des résonateurs en cuivre

#### A.1.1 Étape préliminaire

- Prendre une gaufre de silicium haute-résistivité de 75 mm.
- Faire un nettoyage (2 minutes dans l'acétone suivie de 2 minutes dans l'IPA).
- Déshydrater dans le four à étuve 30 minutes à 125 °C

#### A.1.2 Lithographie

- Mettre 5 gouttes de HMDS durant le premier cycle de rotation (1000RPM pendant 3 secondes)
- Tourner à 4000RPM pendant 30 secondes
- Mettre un papier imbibé de EBR dans le fond de l'étaleuse (imbibé entre chaque échantillon)
- Mettre la résine (AZ P4903) sur la surface directement de la bouteille
- Tourner à 500RPM pendant 15 secondes puis à 3000RPM pendant 100 secondes
- À l'aide d'une seringue remplie d'EBR, enlever le edge bead
- Faire un recuit de 1min 30 sec à 105 °C
- Mettre la résine sur la surface directement de la bouteille
- Tourner à 500RPM pendant 15 secondes puis à 3000RPM pendant 100 secondes
- À l'aide d'une seringue remplie d'EBR, enlever le edge bead
- Faire un recuit de 6 min à 105 °C
- Exposer durant 70 sec
- Développé dans l'AZ400K:H<sub>2</sub>O (1:3) pendant 4 minutes.

#### A.1.3 ASE

- Prendre une gaufre de quartz de 100 mm chauffé à 85 °C
- Mettre de la colle sur 80% du quartz avant d'y déposer la gaufre de silicium
- Laisser reposer sur la plaque durant 5 minutes en pesant légèrement avec des pinces de façon à faire bouger la gaufre.
- Faire la demande de service.
- Suite à la demande de service, décoller les gaufres dans l'eau chaude ou à l'aide d'une plaque chauffante
- Mettre la gaufre de silicium dans du remover 1165 et compléter le nettoyage avec les solvants.
- Laver la gaufre de quartz avec un linge imbibé de méthanol.

#### A.1.4 Greffage de la couche d'accroche

##### Nettoyage

- Mettre les échantillons dans le Piranha durant 10 minutes

- Enlever l'oxyde natif (HF 1:50 durant 3 minutes, eau durant 1 minute 30 secondes)
- Chauffer une solution de SC1 à 80 °C puis y mettre l'échantillon durant 10 minutes
- Refaire un piranha de 10 minutes

### **Activation au Palladium**

- Déposer la solution dans un bain-marie à 70 °C sans que les tranches touchent le fond du bécher (utiliser un support à gaufre)
- Laisser les échantillons immergés durant 10 minutes.
- Bien rincer les échantillons avant de passer à la solution suivante.

### **déposition autocatalytique de NiB**

- Déposer la solution de déposition autocatalytique dans un bain-marie à 70 °C
- Laisser les échantillons immergés durant 6 minutes ou jusqu'à ce que la couche soit uniforme. Les tranches ne doivent pas toucher le fond du bécher (utiliser un support à gaufre)
- Pour s'assurer que la déposition autocatalytique est réussie, mesurer la résistance sur la surface de l'échantillon ( $\sim 100 \Omega$  ou moins)

Si la couche d'accroche ne s'est pas bien greffée, il est possible de recommencer. Pour se faire, il suffit de refaire le nettoyage de la section A.1.4. De plus, il est préférable de faire le nettoyage dans la même journée que l'activation et la déposition autocatalytique.

## **A.1.5 Électroplaquage**

- Installer les deux électrodes sur des supports
- Prendre les plaques de cuivre et les suspendre aux bornes positives
- Mettre l'échantillon sur la borne négative
- Ajuster la densité de courant à 5 mA
- Initier le plaquage en s'assurant que le courant circule bien dans le circuit sans quoi le plaquage ne s'effectuera pas
- Procéder à l'électroplaquage environ 7 minutes de manière à obtenir une couche d'environ 2  $\mu\text{m}$

## **A.1.6 Dry film**

### **Application du dry film**

- Le dry film utilisé est celui de 50  $\mu\text{m}$
  - Partir le laminateur pour le faire chauffer à 96 °C
  - Couper deux carrés de dry film couvrant tout l'échantillon
  - Enlever le plastique protecteur sur le premier et déposer le dry film sur le porteur
  - Déposer l'échantillon sur le dry film
  - Enlever le plastique protecteur sur le deuxième carré de dry film
  - Placer le dry film pour couvrir l'échantillon
  - Mettre le porteur dans le laminateur
  - Pendant que l'échantillon passe dans le laminateur, s'assurer que la couche de dry film supérieur ne fait pas de pli.
  - Faire un recuit à 100 °C pendant 45 s
-

### Lithographie

- Exposer l'échantillon pendant 5 s à  $15 \text{ mW cm}^{-2}$
- Faire un recuit à  $100^\circ\text{C}$  pendant 45 s
- Enlever la dernière couche de plastique
- Développer dans l'AZ 400K (1:3) durant 4 minutes
- Bien rincer à l'eau
- Faire un recuit à  $100^\circ\text{C}$  pendant 6 minutes

#### A.1.7 Gravure du cuivre

- Mettre du chrome etch dans un b  cher de manière à bien couvrir l'échantillon
- Immerger l'échantillon dans le chrome etch
- Laisser l'échantillon immergé jusqu'à ce que le cuivre soit parti des endroits non désirés (15 à 30 minutes selon l'épaisseur de cuivre sur la tranche)
- Rincer l'échantillon à l'eau
- Sécher à l'azote

### Nettoyage

- Enlever le plastique sous la tranche
- Immerger l'échantillon dans du Remover 1165 au moins 1 h
- Faire un nettoyage acétone-IPA 5 minutes dans chaque solution

#### A.1.8 Découpe

- Faire la découpe du silicium au LPKF
- Coller l'échantillon sur la table de travail à l'aide de ruban adhésif
- Utiliser la job Silicium 500um Patrice

## A.2 Procédé de fabrication des résonateurs en étain

### A.2.1 étape préliminaire

- Prendre une gaufre de silicium haute-résistivité de 75 mm.
- Faire un nettoyage (2 minutes dans l'acétone suivie de 2 minutes dans l'IPA).
- Déshydrater dans le four à étuve 30 minutes à  $125^\circ\text{C}$

### A.2.2 Lithographie

- Mettre 5 gouttes de HMDS durant le premier cycle de rotation (1000RPM pendant 3 secondes)
  - Tourner    4000RPM pendant 30 secondes
  - Mettre un papier imbibé de EBR dans le fond de l'  taleuse (imbibé entre chaque échantillon)
  - Mettre la résine (AZ P4903) sur la surface directement de la bouteille
  - Tourner    500RPM pendant 15 secondes puis à 3000RPM pendant 100 secondes
  -    l'aide d'une seringue remplie d'EBR, enlever le edge bead
  - Faire un recuit de 1min 30 sec à  $105^\circ\text{C}$
  - Mettre la résine sur la surface directement de la bouteille
  - Tourner    500RPM pendant 15 secondes puis à 3000RPM pendant 100 secondes
-

- À l'aide d'une seringue remplie d'EBR, enlever le edge bead
- Faire un recuit de 6 min à 105 °C
- Exposer durant 70 sec
- Développé dans l'AZ400K:H<sub>2</sub>O (1:3) pendant 4 minutes.

### **A.2.3 ASE**

- Prendre une gaufre de quartz de 100 mm chauffé à 85 °C
- Mettre de la colle sur 80% du quartz avant d'y déposer la gaufre de silicium
- Laisser reposer sur la plaque durant 5 minutes en pesant légèrement avec des pinces de façon à faire bouger la gaufre.
- Faire la demande de service.
- Suite à la demande de service, décoller les gaufres dans l'eau chaude ou à l'aide d'une plaque chauffante
- Mettre la gaufre de silicium dans du remover 1165 et compléter le nettoyage avec les solvants.
- Laver la gaufre de quartz avec un linge imbibé de méthanol.

### **A.2.4 Greffage de la couche d'accroche**

#### **Nettoyage**

- Mettre les échantillons dans le Piranha durant 10 minutes
- Enlever l'oxyde natif (HF 1:50 durant 3 minutes, eau durant 1 minute 30 secondes)
- Chauffer une solution de SC1 à 80 °C puis y mettre l'échantillon durant 10 minutes
- Refaire un piranha de 10 minutes

#### **Déposition d'or**

- Faire une demande de service en physique pour le dépôt d'or
- Demander une couche d'accroche de chrome d'environ 60 nm
- Faire déposer 100 nm d'or

### **A.2.5 Électroplaquage**

- Installer les deux électrodes sur des supports
- Prendre les plaques d'étain et les suspendre aux bornes positives
- Mettre l'échantillon sur la borne négative
- Ajuster la densité de courant à 5 mA
- Initier le plaquage en s'assurant que le courant circule bien dans le circuit sans quoi le plaquage ne s'effectuera pas
- Procéder à l'électroplaquage environ 10 minutes de manière à obtenir une couche d'environ 2 µm

### **A.2.6 Dry film**

#### **Application du dry film**

- Le dry film utilisé est celui de 50 µm
  - Partir le laminateur pour le faire chauffer à 96 °C
  - Couper deux carrés de dry film couvrant tout l'échantillon
  - Enlever le plastique protecteur sur le premier et déposer le dry film sur le porteur
  - Déposer l'échantillon sur le dry film
-

- Enlever le plastique protecteur sur le deuxième carré de dry film
- Placer le dry film pour couvrir l'échantillon
- Mettre le porteur dans le lamineur
- Pendant que l'échantillon passe dans le lamineur, s'assurer que la couche de dry film supérieur ne fait pas de pli.
- Faire un recuit à 100 °C pendant 45 s

### **Lithographie**

- Exposer l'échantillon pendant 5 s à 15 mW cm<sup>-2</sup>
- Faire un recuit à 100 °C pendant 45 s
- Enlever la dernière couche de plastique
- Développer dans l'AZ 400K (1:3) durant 4 minutes
- Bien rincer à l'eau
- Faire un recuit à 100 °C pendant 6 minutes

### **A.2.7 Gravure de l'étain**

- Immerger l'échantillon dans une solution de HCl 30% (Concentration du HCl vendu) jusqu'à ce qu'il ne reste plus d'étain (environ 5 minutes)
- Rincer l'échantillon à l'eau
- Sécher à l'azote

### **Nettoyage**

- Enlever le plastique sous la tranche
- Immerger l'échantillon dans du Remover 1165 au moins 1 h
- Faire un nettoyage acétone-IPA 5 minutes dans chaque solution

### **A.2.8 Découpe**

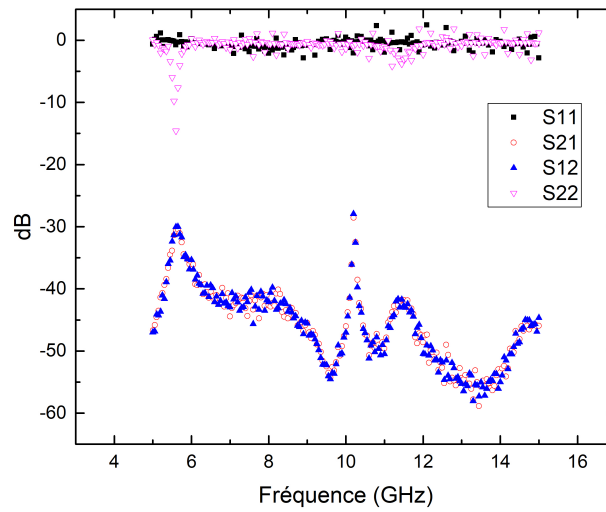
- Faire la découpe du silicium au LPKF
  - Coller l'échantillon sur la table de travail à l'aide de ruban adhésif
  - Utiliser la job Silicium 500um Patrice
-



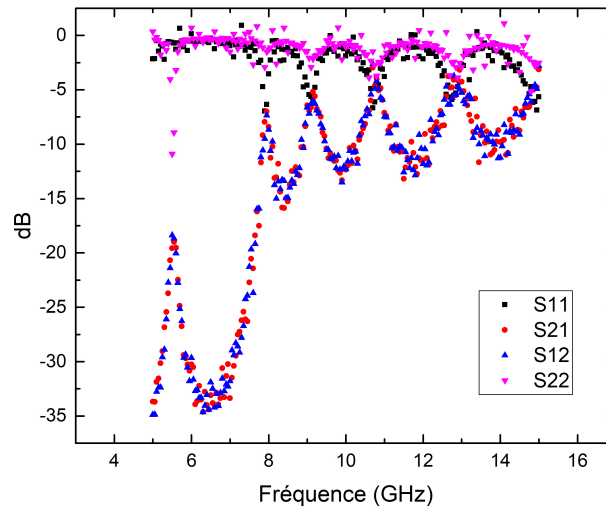
# ANNEXE B

## DONNÉES

### B.1 Résonateur en cuivre

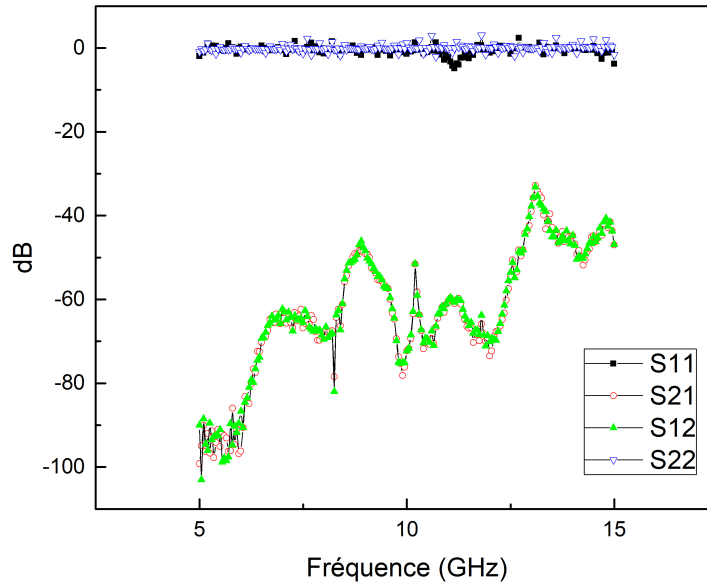


(a)

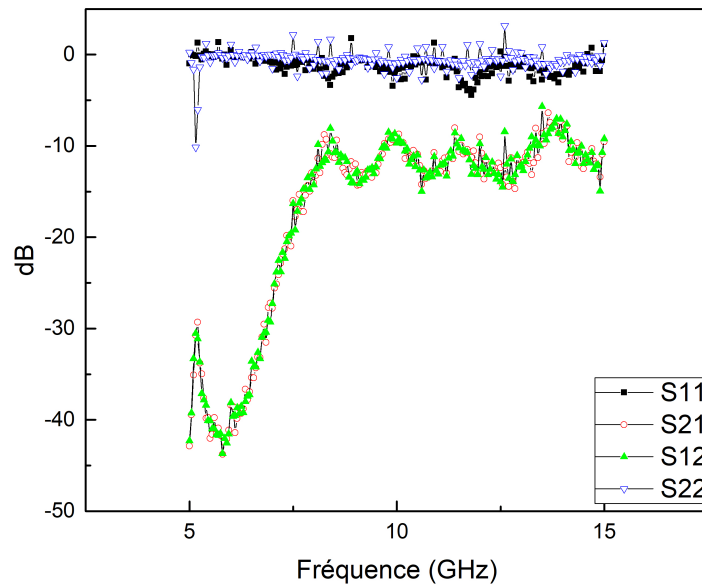


(b)

Figure B.1 Caractérisation à température ambiante d'un résonateur (a) et d'une ligne à transmission (b) en cuivre dans la fixture.



(a)



(b)

Figure B.2 Caractérisation à température ambiante d'un résonateur (a) et d'une ligne à transmission (b) en cuivre avec la croix dans la boîte.



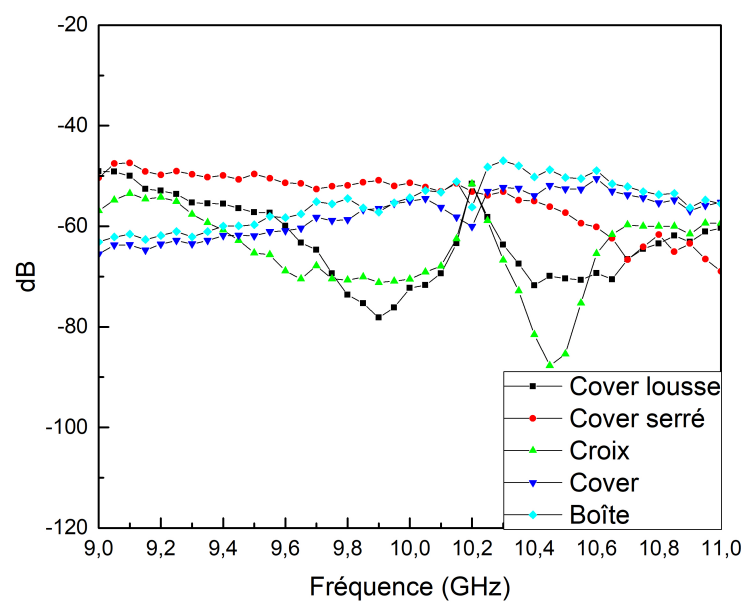
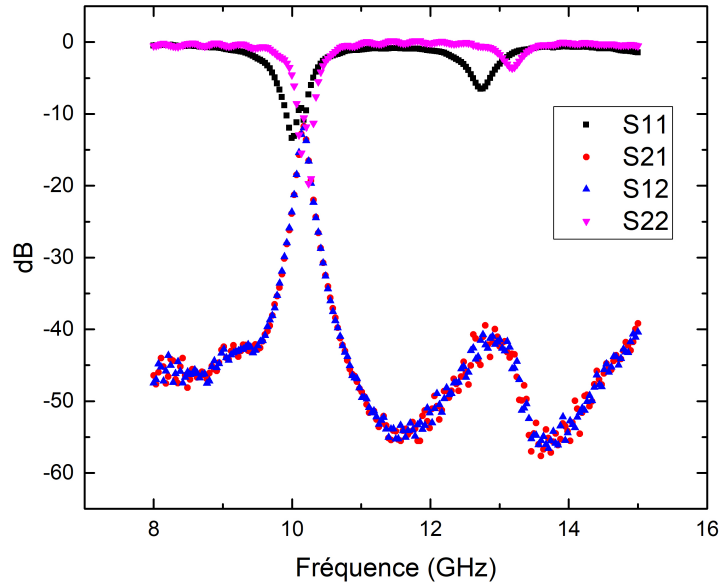
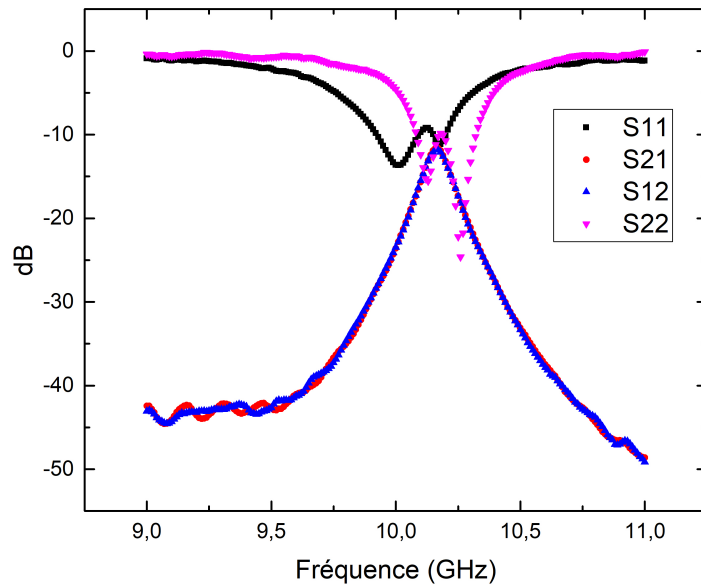


Figure B.3 Effet d'ajouter le couvercle et la croix.



(a)



(b)

Figure B.4 Caractérisation du résonateur en étain N168A 1 (a) et d'un grossissement de la zone d'intérêt (b) à température ambiante.

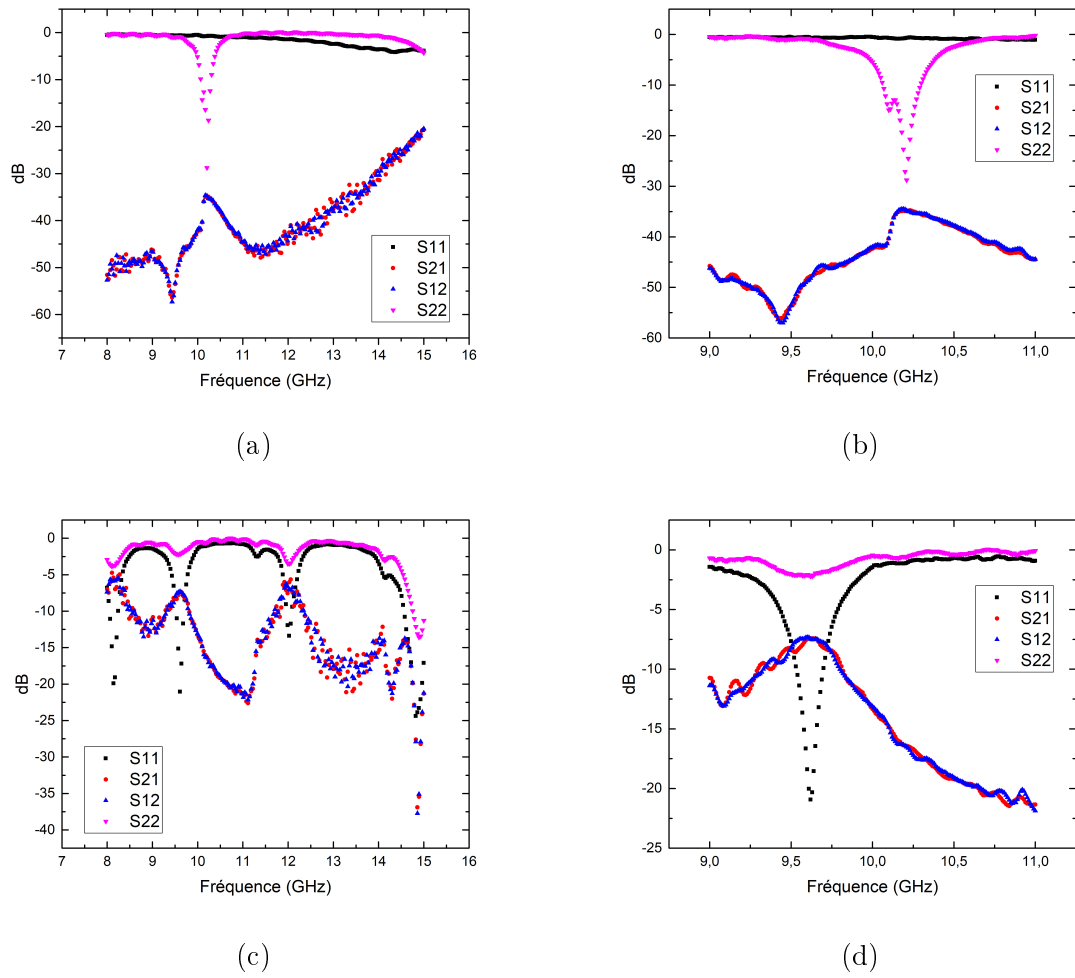
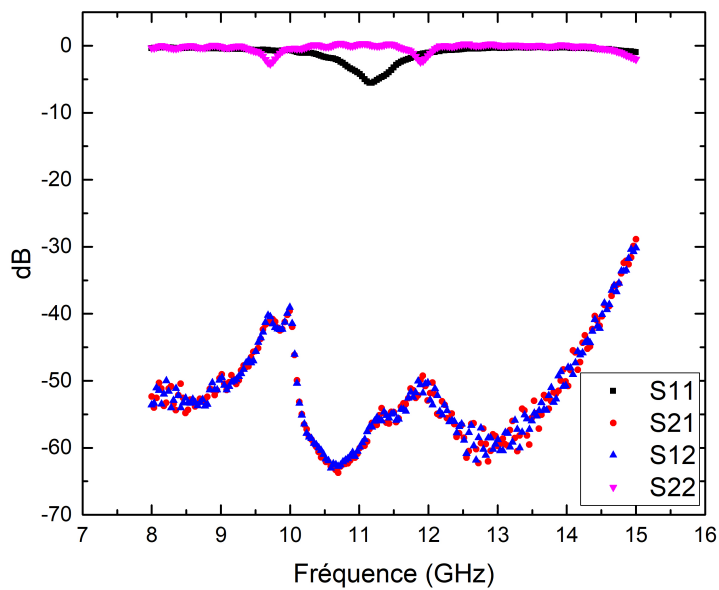
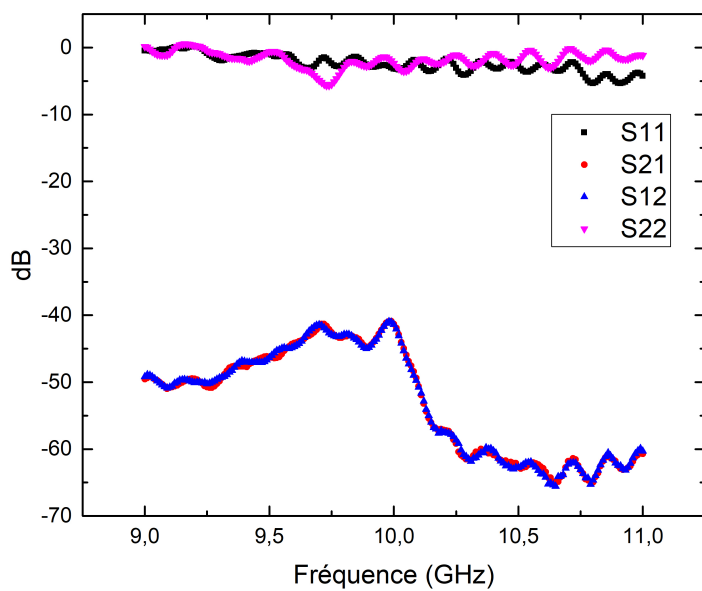


Figure B.5 Caractérisation du résonateur N168A 2 à température ambiante.  
 (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d)  
 Zone d'intérêt de la ligne à transmission

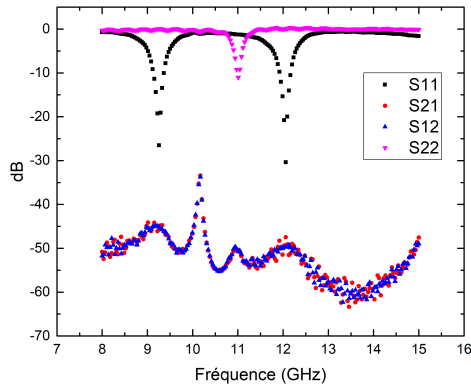


(a)

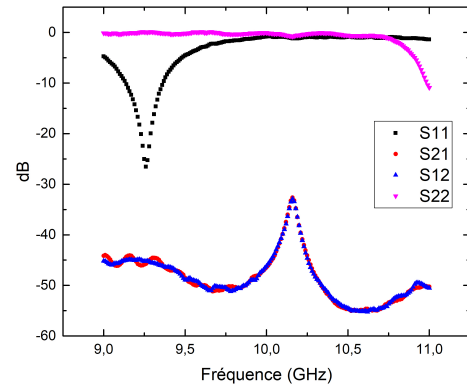


(b)

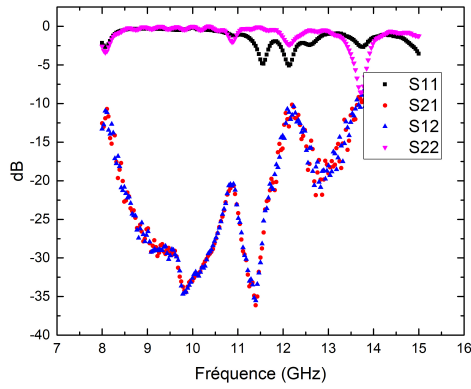
Figure B.6 Caractérisation du résonateur (a) en étain N168A 3 et grossissement de la zone d'intérêt (b) à température ambiante dans la fixture.



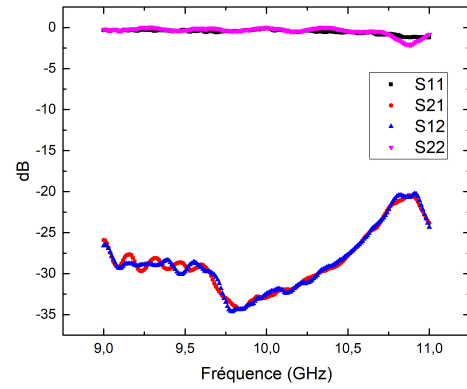
(a)



(b)

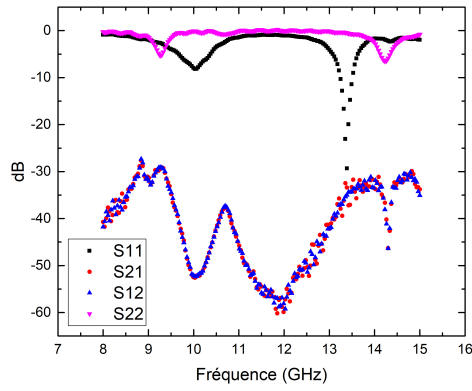


(c)

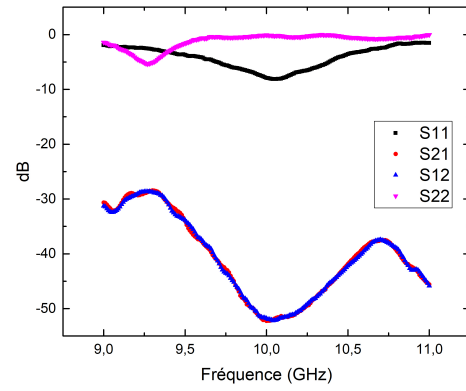


(d)

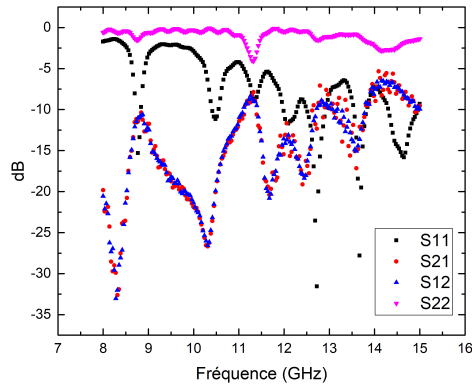
Figure B.7 Caractérisation du résonateur en étain N168B 1 à température ambiante dans la fixture. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission



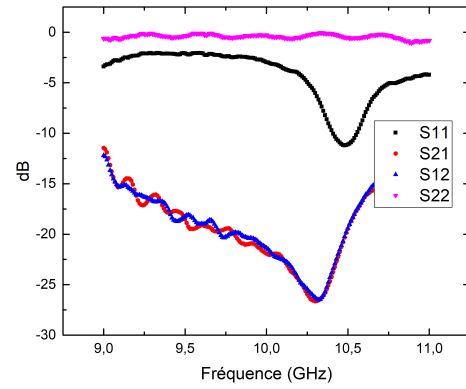
(a)



(b)

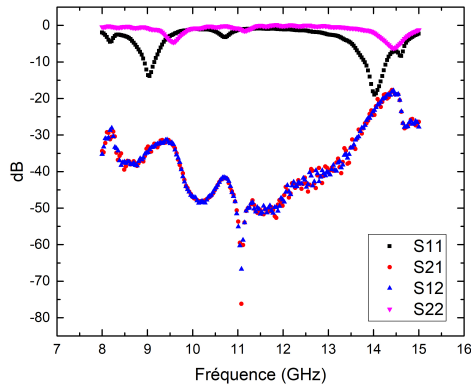


(c)

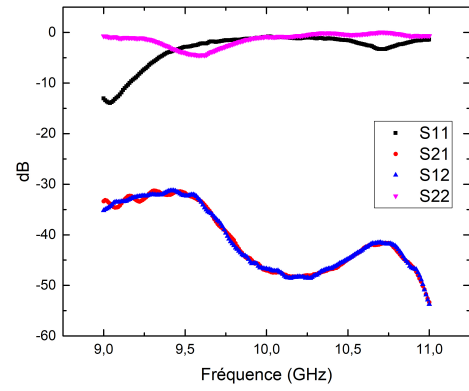


(d)

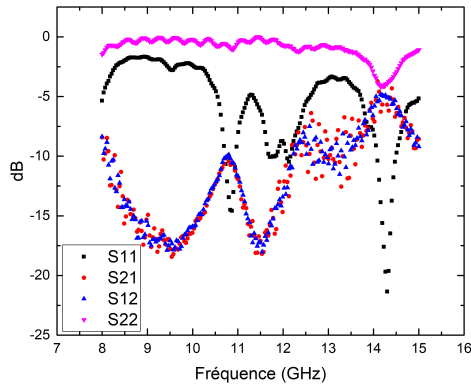
Figure B.8 Caractérisation du résonateur en étain N168B 2 à température ambiante dans la fixture. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission



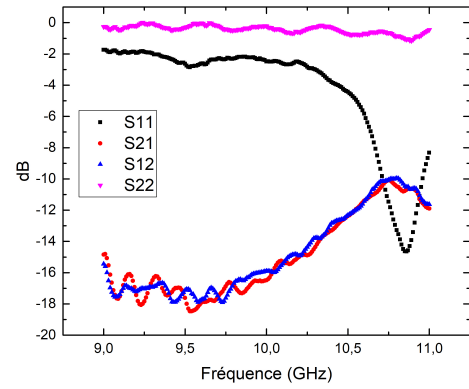
(a)



(b)

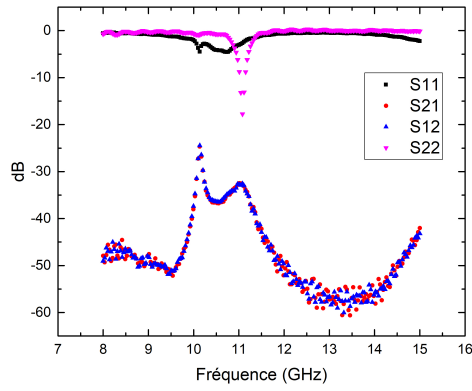


(c)

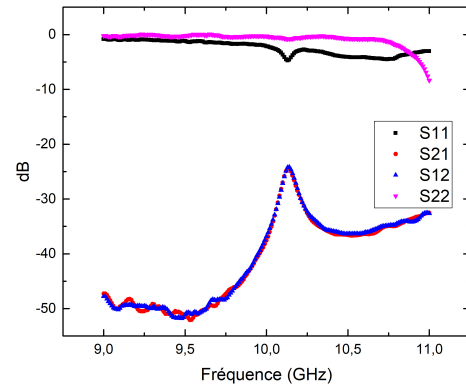


(d)

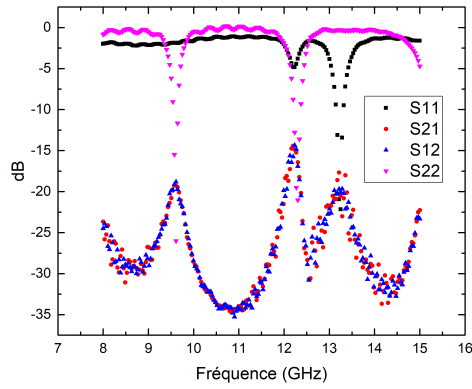
Figure B.9 Caractérisation du résonateur en étain N168B 3 à température ambiante. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission



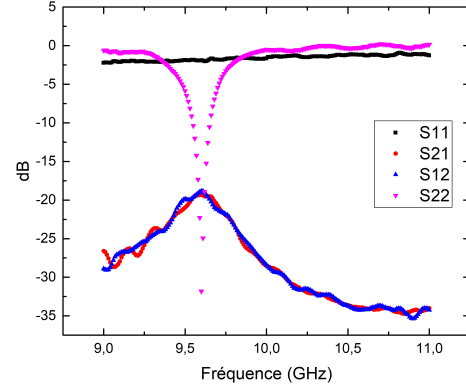
(a)



(b)



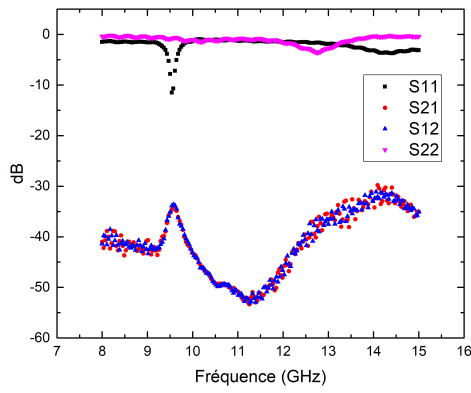
(c)



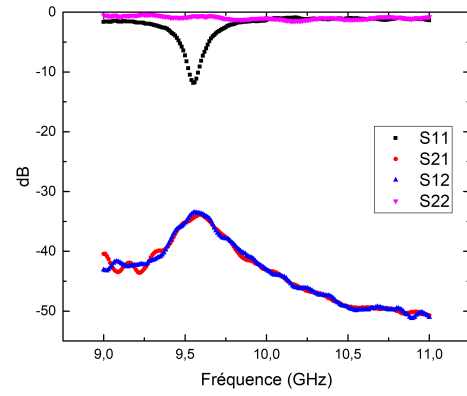
(d)

Figure B.10 Caractérisation du résonateur en étain N168C 1 à température ambiante. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission

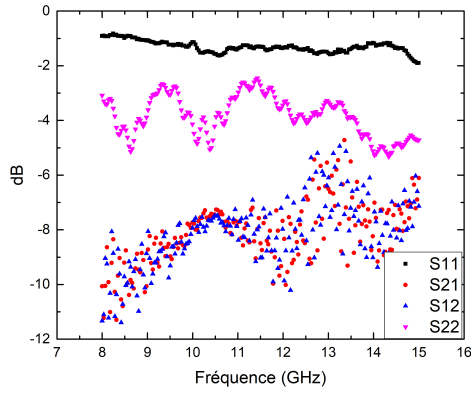




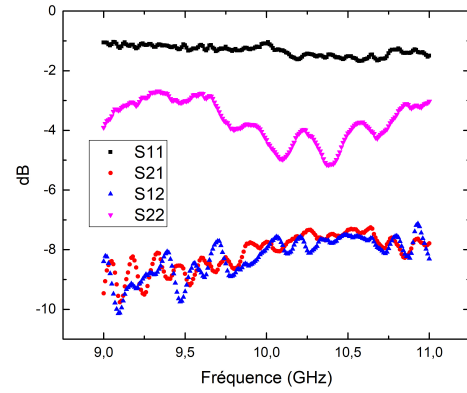
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure B.11 Caractérisation du résonateur en étain N168C 3 à température ambiante. (a) Résonateur (b) Zone d'intérêt du résonateur (c) Ligne à transmission (d) Zone d'intérêt de la ligne à transmission



# LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Allison, G., Oiwa, A., Kumar, S., DiVincenzo, D., Ketchen, M., Hirakawa, K., Takayanagi, H. et Tarucha, S. (2010). A superconducting resonator designed for coupling to spin based qubits in quantum dots. Dans *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing. Volume 245. p. 012024.
- [2] Axline, C., Reagor, M., Heeres, R. W., Reinhold, P., Wang, C., Shain, K., Pfaff, W., Chu, Y., Frunzio, L. et Schoelkopf, R. J. (2016). A coaxial line architecture for integrating and scaling 3d cqed systems. *arXiv preprint arXiv:1604.06514*.
- [3] Bogorin, D. F., McClure, D. T., Ware, M. et Plourde, B. (2014). Copper waveguide cavities with reduced surface loss for coupling to superconducting qubits. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, volume 24, numéro 4, p. 1–7.
- [4] Bothner, D., Gaber, T., Kemmler, M., Koelle, D., Kleiner, R., Wünsch, S. et Siegel, M. (2012). Magnetic hysteresis effects in superconducting coplanar microwave resonators. *Physical Review B*, volume 86, numéro 1, p. 014517.
- [5] Bozzi, M., Georgiadis, A. et Wu, K. (2011). Review of substrate-integrated waveguide circuits and antennas. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, volume 5, numéro 8, p. 909–920.
- [6] Bray, J. et Roy, L. (2003). Resonant frequencies of post-wall waveguide cavities. *IEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, volume 150, numéro 5, p. 365–368.
- [7] Calusine, G., Melville, A., Woods, W., Das, R., Stull, C., Bolkhovskiy, V., Braje, D., Hover, D., Kim, D. K., Miloshi, X. et coll. (2018). Analysis and mitigation of interface losses in trenched superconducting coplanar waveguide resonators. *Applied Physics Letters*, volume 112, numéro 6, p. 062601.
- [8] Cassivi, Y., Perregrini, L., Arcioni, P., Bressan, M., Wu, K. et Conciauro, G. (2002). Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide. *IEEE Microwave and Wireless components letters*, volume 12, numéro 9, p. 333–335.
- [9] Chen, X.-P. et Wu, K. (2008). Substrate integrated waveguide cross-coupled filter with negative coupling structure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, volume 56, numéro 1, p. 142–149.
- [10] Cheng, D. K. et coll. (1989). *Field and wave electromagnetics*. Pearson Education India.
- [11] Choi, S. T., Yang, K. S., Tokuda, K. et Kim, Y. H. (2004). A v-band planar narrow bandpass filter using a new type integrated waveguide transition. *IEEE microwave and wireless components letters*, volume 14, numéro 12, p. 545–547.

- 
- [12] Deslandes, D. (2007). *Etude et developpement du guide d'ondes integre au substrat pour la conception de systemes en ondes millimetriques*. Thèse de doctorat, École polytechnique de Montréal.
  - [13] Deslandes, D. et Wu, K. (2003). Single-substrate integration technique of planar circuits and waveguide filters. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, volume 51, numéro 2, p. 593–596.
  - [14] Deslandes, D. et Wu, K. (2006). Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, volume 54, numéro 6, p. 2516–2526.
  - [15] Devoret, M. H. et Schoelkopf, R. J. (2013). Superconducting circuits for quantum information: an outlook. *Science*, volume 339, numéro 6124, p. 1169–1174.
  - [16] DiVincenzo, D. P. *et coll.* (2000). The physical implementation of quantum computation. *arXiv preprint quant-ph/0002077*.
  - [17] Djerafi, T., Wu, K. et Deslandes, D. (2012). Temperature drift compensation technique for substrate integrated waveguide oscillator. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, volume 22, numéro 9, p. 489–491.
  - [18] Green, T. (2014). Gold etching for microfabrication. *Gold Bulletin*, volume 47, numéro 3, p. 205–216.
  - [19] Hirokawa, J. et Ando, M. (1998). Single-layer feed waveguide consisting of posts for plane tem wave excitation in parallel plates. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, volume 46, numéro 5, p. 625–630.
  - [20] Jordan, E. C. (2002). *Reference data for engineers: radio, electronics, computer, and communications*. 9<sup>e</sup> édition. HW Sams, p. 30–4.
  - [21] Kanani, N. (2004). *Electroplating: basic principles, processes and practice*. Elsevier.
  - [22] Krupka, J., Breeze, J., Alford, N. M., Centeno, A. E., Jensen, L. et Claussen, T. (2006). Measurements of permittivity and dielectric loss tangent of high resistivity float zone silicon at microwave frequencies. Dans *Microwaves, Radar & Wireless Communications, 2006. MIKON 2006. International Conference on*, IEEE. p. 1097–1100.
  - [23] Lucero, E., Steffen, M., Gambetta, J., Abraham, D., Corcoles, A. et Team, Q. C. (2013). Extended coherence times of superconducting transmon qubits. Dans *APS Meeting Abstracts*.
  - [24] Matthias, B. T., Geballe, T. H. et Compton, V. B. (1963). Superconductivity. *Reviews of Modern Physics*, volume 35, numéro 1, p. 1.
  - [25] Mazin, B. A. (2004). *Microwave Kinetic Inductance Detectors*. Mémoire de maitrise, California Institute of Technology, Pasadena, California.
-

- 
- [26] Megrant, A., Neill, C., Barends, R., Chiaro, B., Chen, Y., Feigl, L., Kelly, J., Lucero, E., Mariantoni, M., O'Malley, P. *et coll.* (2012). Planar superconducting resonators with internal quality factors above one million. *Applied Physics Letters*, volume 100, numéro 11, p. 113510.
- [27] Michaud, F. (2013). *Fabrication de résonateurs en niobium pour le traitement de l'information quantique avec des qubits de spin*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- [28] Pechal, M., Arrangoiz-Arriola, P. et Safavi-Naeini, A. H. (2018). Superconducting circuit quantum computing with nanomechanical resonators as storage. *Quantum Science and Technology*, volume 4, numéro 1, p. 015006.
- [29] Rahim, M. J., Lehleiter, T., Bothner, D., Krellner, C., Koelle, D., Kleiner, R., Dressel, M. et Scheffler, M. (2016). Metallic coplanar resonators optimized for low-temperature measurements. *Journal of Physics D: Applied Physics*, volume 49, numéro 39, p. 395501.
- [30] Rigetti, C., Gambetta, J. M., Poletto, S., Plourde, B., Chow, J. M., Córcoles, A., Smolin, J. A., Merkel, S. T., Rozen, J., Keefe, G. A. *et coll.* (2012). Superconducting qubit in a waveguide cavity with a coherence time approaching 0.1 ms. *Physical Review B*, volume 86, numéro 10, p. 100506.
- [31] Sage, J. M., Bolkhovskiy, V., Oliver, W. D., Turek, B. et Welander, P. B. (2011). Study of loss in superconducting coplanar waveguide resonators. *Journal of Applied Physics*, volume 109, numéro 6, p. 063915.
- [32] Shang, C. K., Wang, V., Chen, R., Gupta, S., Huang, Y.-C., Pao, J. J., Huo, Y., Sanchez, E., Kim, Y., Kamins, T. I. *et coll.* (2016). Dry-wet digital etching of ge1- x sn x. *Applied Physics Letters*, volume 108, numéro 6, p. 063110.
- [33] Swenson, C. (1983). Recommended values for the thermal expansivity of silicon from 0 to 1000 k. *Journal of physical and chemical reference data*, volume 12, numéro 2, p. 179–182.
- [34] Tang, H., Hong, W., Hao, Z., Chen, J. et Wu, K. (2005). Optimal design of compact millimetre-wave siw circular cavity filters. *Electronics Letters*, volume 41, numéro 19, p. 1068–1069.
- [35] University of California, Berkeley (2018). *Chapter 1.10, Miscellaneous Etchants*. Berkeley Microfabrication Laboratory.
- [36] Wang, Y., Li, Y., Yin, Z.-q. et Zeng, B. (2018). 16-qubit ibm universal quantum computer can be fully entangled. *npj Quantum Information*, volume 4, numéro 1, p. 46.
- [37] Wei, L. X., Haseeb, A. et Yingxin, G. (2012). Effects of thiourea and gelatin on the electrodeposition of sn-ag solder alloy. Dans *2012 4th Asia Symposium on Quality Electronic Design (ASQED)*, IEEE. p. 291–296.
-

- [38] Xu, F. et Wu, K. (2005). Guided-wave and leakage characteristics of substrate integrated waveguide. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, volume 53, numéro 1, p. 66–73.
  - [39] Zeid, A. et Baudrand, H. (2002). Electromagnetic scattering by metallic holes and its applications in microwave circuit design. *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, volume 50, numéro 4, p. 1198–1206.
-